

## **RAPPORT D'ETAPE**

Post doctorat (juin 2003-juin 2004)

---

**UTILISATION DES DONNEES DE TELEDETECTION POUR  
L'ESTIMATION DU RENDEMENT EN TIGE ET EN SUCRE CHEZ LA  
CANNE A SUCRE EN GUADELOUPE ET A LA REUNION.**

---

**Anne PELLEGRINO**

Laboratoire GEOTROP du CIRAD/AMIS/Agronomie  
Responsable d'équipe : Agnès BEGUE

## **1. OBJECTIFS DE L'ETUDE.**

La prédiction du rendement en tige usinable et en sucre chez la canne à sucre est essentielle pour améliorer l'organisation de la récolte, la gestion des quotas de coupe ainsi que la gestion de l'approvisionnement des usines. Le projet SUCRETTE, mené par le CIRAD en collaboration avec Spot Image, avait pour objectif de créer un SIG générant des produits cartographiques d'aide à la gestion de la production, notamment de caractérisation des pratiques culturales (coupes, replantations, irrigation), du développement végétatif de la culture et d'estimation de la production, en Guadeloupe, à la Réunion et à l'île Maurice (Ribbes et al., 2002 ; Bégué et al., 2004). Cette étude, menée au sein de ce projet était centrée plus particulièrement sur l'analyse des potentialités de séries temporelles d'images satellite pour estimer le rendement parcellaire en tige et en sucre sur les sites de la Guadeloupe et de la Réunion caractérisés par des conditions pédoclimatiques contrastées, différentes variétés, et pour différents âges culturels, afin d'élaborer des cartes de prédiction de ces variables.

La première étape de ce travail visait à décomposer les relations entre les données radiométriques parcellaires et les variables de production à une échelle plus fine, l'échelle de la placette. La qualité des relations entre des variables agronomiques, composantes biochimiques ou biophysiques du couvert végétal pertinentes à la fois pour les données radiométriques et la production, - SPAD, nombre de feuilles vertes - et d'autres variables agronomiques également pertinentes pour la production - teneur en eau relative des feuilles, BRIX - a été analysée. L'ensemble de ces variables a ensuite été relié aux réflectances ou aux indices radiométriques issus de ces réflectances (indice de végétation, NDVI ; rapport vert/rouge) définis aux mêmes dates et à la même échelle. Les potentialités des séries temporelles de réflectances ou d'indices radiométriques pour prédire le rendement en tiges usinables ou en sucre ont alors été analysées à l'échelle parcellaire. Trois méthodes d'estimation de la production par les données radiométriques ont été comparées. Les données radiométriques ont été reliées directement aux variables de production. L'apport du couplage de ces données radiométriques à des modèles agronomiques de production via le NDVI qui est relié à l'efficacité d'interception (Bégué, 2002) ou à l'indice foliaire (Bappel et al., 2004) a également été analysé. Deux types de modèles agronomiques de production ont été testés : le modèle empirique de Monteith simulant la production primaire nette pour une culture annuelle bien irriguée et fertilisée (Kumar et Monteith, 1981 ; Varlet-Grancher et al., 1982), requérant un nombre limité de variables d'entrée, et le modèle MOSICAS de simulation de la

croissance de la canne à sucre en conditions optimales de fertilisation, paramétrisé dans les conditions de la Réunion (Martiné, 2003) et nécessitant un nombre accru de variables d'entrée.

## **2. MATERIELS ET METHODES.**

### **2.1. Protocoles et dispositifs expérimentaux en Guadeloupe (cycle 2002-2003 & 2003-2004)**

*Voir comptes-rendus de Marie Guitton et de Stéphanie Catsidonis.*

### **2.2. Données climatiques en Guadeloupe**

Les données climatiques journalières : température moyenne (T), évapotranspiration potentielle Penman Monteith (ETP) et rayonnement global (RG) sont issues de la station météorologique de Gardel (Catsidonis, 2003). Neuf pluviomètres sont présents sur l'exploitation de Gardel. D'importantes différences sont observées entre ces pluviomètres. Elles atteignent 225 mm sur l'année en 2002 (tableau 1) Les données pluviométriques journalières (P) sont par conséquent calculées pour chaque parcelle au prorata des surfaces des zones pluviométriques qui lui sont affectées<sup>1</sup> en utilisant la plate-forme de simulation SIMULEX. Ces dernières sont déterminées à partir de la méthode des polygones de Thiessen (Remond, 2002 ; Catsidonis, 2003).

**Tableau 1 : Pluviométrie cumulée (Pcum) au cours de l'année 2002 pour chaque pluviomètre de l'exploitation de Gardel.**

Les tirets correspondent à l'absence de valeur.

<b>Pluviomètre</b>	<b>Pcum (mm)</b>
Belloc	-
Boisvin	1154
Courcelles	1041
Marly	1266
Monplaisir	1119
Pombiray	1179
Reneville	1100
Simonnière	-
Ste Marie	1055

<sup>1</sup> Lorsque les données d'un pluviomètre sont manquantes (cas de Belloc et Simonnière), la parcelle se voit affecter les données du pluviomètre le plus proche.

### **2.3. Rendement et teneur en sucre**

Des différences ayant été observées entre les surfaces parcellaires présentes dans les rapports de production de Gardel (cycle 2002-2003) et celles calculées sous MapInfo, les valeurs de rendement (t/ha) sont corrigées pour chaque parcelle à partir des valeurs de tonnage par parcelle fournies dans ces rapports et des surfaces parcellaires de MapInfo.

La richesse saccharine calculée par le CTICS en Guadeloupe intègre des facteurs d'extraction et de cristallisation du sucre compte tenu de la composition des cannes ainsi que les performances d'extraction de l'usine. La richesse en sucre vraie des cannes (pol canne) est calculée pour chaque parcelle de façon à pouvoir comparer cette richesse aux valeurs de richesse simulées par le modèle de production MOSICAS (voir ci-dessous). Les valeurs de richesse fournies par le CTICS à la Réunion sont par ailleurs également des valeurs de pol canne (Martiné, com. pers.). Le pol canne est déterminé pour la Guadeloupe à partir d'une relation entre la richesse saccharine et le pol canne établie à partir de 6 fiches de mesure du CTICS (annexe 1). Ce dernier est calculé à partir de la teneur en sucre de jus et du gâteau selon Todoroff (2000).

Le rendement en sucre par hectare est déterminé pour les dispositifs de Guadeloupe et de la Réunion en multipliant le pol canne au rendement en tige.

### **2.4. Radiométrie**

#### **2.4.1. Traitement des images SPOT et extraction des réflectances**

Une image SPOT 4 ou 5 est programmée de façon mensuelle pendant les cycles culturaux 2002-2003 en Guadeloupe (tableau 2) et à la Réunion. Les corrections géométriques et radiométriques des images sont réalisées sous ERDAS IMAGINE (version 8.6) en utilisant pour le dispositif de Guadeloupe l'angle d'incidence et les coefficients d'étalonnage absolu se trouvant dans le tableau 2. L'image du 12/07/2002 n'est pas retenue par la suite en raison de la saturation dans les bandes spectrales proche et moyen infrarouge (PIR, MIR). L'image du 30/04/2003 est une image prise dans le Hot-Spot. Les valeurs de réflectances extraites à partir



de cette image ne sont pas utilisées. Seules les valeurs de NDVI déduites des réflectances sont retenues.

**Tableau 2 : Paramètres physiques et coefficients d'étalonnage absolu des images SPOT 4 ou 5 programmées.**

Date	Satellite (capteur)	Niveau	Incidence R=(-)	Soleil (élévation)	Azimuth	<i>Coefficients étalonnage absolu (W.m-2.sr-1.µm-1)</i>			
						XS1	XS2	XS3	XS4
12/07/2002	5 (2)	2a	-5.3	69.8	70.0	2.4325	2.4571	4.2000	15.0177
19/09/2002	4 (2)	2a	6.9	67.2	127.8	1.3545	1.7627	1.2735	8.1911
24/10/2002	5 (2)	2a	-6.8	52.1	143.3	1.3828	1.7846	2.4352	8.8875
06/12/2002	4 (1)	2a	5.9	47.2	155.9	1.4329	1.8185	1.2457	9.0435
21/01/2003	5 (2)	2a	-16.5	46.7	145.7	1.0410	1.3438	1.7671	6.8353
11/02/2003	5 (2)	2a	-23.5	50.1	138.5	1.0032	1.2995	1.8358	8.3357
29/03/2003	5 (2)	2a	-6.1	66.3	122.2	1.0032	1.2995	1.8358	8.3357
30/04/2003	5 (1)	2a	-23.5	68.9	91.7	1.0805	1.2653	1.8716	8.3337
04/05/2003	5 (1)	2a	22.1	74.7	90.1	1.0805	1.2653	1.8716	8.3337
25/05/2003	5 (1)	2a	14.6	73.4	71.5	1.0805	1.2653	1.8716	8.3337

Les valeurs moyennes des réflectances sont extraites à l'échelle de la placette (échelle des mesures des variables agronomiques) en Guadeloupe ou du pixel à la Réunion en raison de la proximité des placettes aux bordures de parcelles, ainsi qu'à l'échelle de la parcelle (échelle des mesures de rendement et de teneur en sucre) pour les deux dispositifs.

Les réflectances moyennes des placettes sont extraites en Guadeloupe à partir d'un buffer carré de 20 m d'arête (3x3 pixels) délimité autour de chaque point gps (annexe 2). Ce buffer est obtenu par rotation de 45 ° des buffers de forme losange délimités sous MapInfo (version 7.0) à partir d'un programme écrit sous visualbasic (Desprès, com. pers.). Dans le cas de chevauchement des buffers, les valeurs de réflectances sont extraites par ERDAS IMAGINE pour chacun des vecteurs non chevauchés ou chevauchés. Ces valeurs de réflectances sont réagrégées pour chaque buffer sous MapInfo au prorata des surfaces individuelles des vecteurs créés.

Un buffer de 20 m est appliqué au parcellaire en Guadeloupe et à la Réunion pour limiter les effets de bordure de parcelles. Les réflectances moyennes parcellaires sont extraites à partir de ce buffer.

#### 2.4.2. Inter-étalonnages SPOT 4/SPOT 5 des réflectances

Les évolutions des réflectances au cours du cycle cultural en Guadeloupe et à la Réunion sont caractérisées par des pics associés au type de satellite SPOT 4/SPOT 5 dont est issue l'image. Un inter-étalonnage SPOT 4/SPOT 5 est par conséquent réalisé en Guadeloupe sur 13 images (3 images SPOT 4 et 10 images SPOT 5) acquises en 2002 et 2003, sur les réflectances moyennes d'une douzaine d'invariants (forêts denses en zone plates, centres urbains, mangroves, sols nus...). Les régressions obtenues entre SPOT 4 et SPOT 5 pour chaque bande spectrale sont représentées en annexe 3. Les valeurs de réflectance issues des images SPOT 4 aux différentes échelles spatiales (placette, parcelle) sont par la suite systématiquement corrigées sous R (version 1.8.1.) par les coefficients des relations. La même procédure d'inter-étalonnage SPOT 4/SPOT 5 est suivie pour le dispositif de la Réunion.

#### 2.4.3. Indices radiométriques

Deux indices radiométriques sont calculés aux différentes échelles (pixel, placette ou parcelle) en Guadeloupe et à la Réunion à partir des réflectances inter-étalonnées par rapport au type de satellite SPOT 4 ou SPOT 5 : le NDVI (issu des réflectances dans les bandes spectrales rouge et proche infrarouge – R, PIR), et le rapport vert/rouge (V/R).

#### ***2.5. Ajustement du NDVI parcellaire au cours du cycle cultural et extraction d'indicateurs de développement du couvert***

Les évolutions au cours du cycle cultural du NDVI moyen parcellaire sont ajustées pour les rejets des dispositifs de la Guadeloupe et de la Réunion après avoir ajouté un point au temps 0 (date de la coupe précédente) représentant la valeur moyenne du NDVI pour un sol paillis (annexes 11 et 12, programme R n°4). Les valeurs moyennes de NDVI pour les sols paillis sont fixées à 0.168 et 0.226 respectivement pour la Guadeloupe et la Réunion. Ces valeurs sont issues des valeurs moyennes de NDVI observées pour chaque parcelle jusqu'à 15 jours après la coupe. Deux fonctions logistiques représentant respectivement les phases de croissance et de sénescence sont utilisées pour ajuster les évolutions du NDVI :

$$\text{NDVI}(t) = M * (\text{CROIS}(t) - \text{SEN}(t))$$

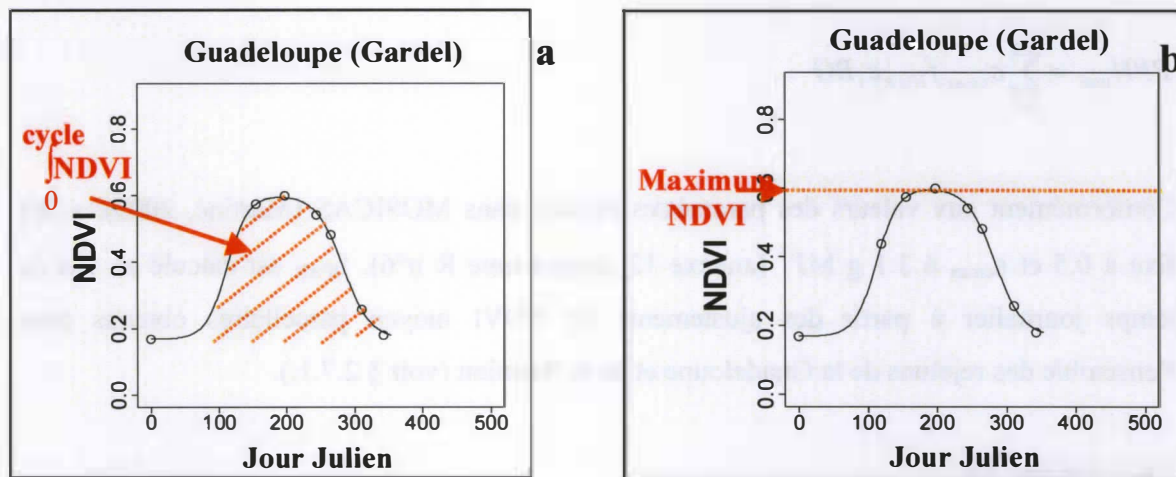
$$\text{avec : } \text{CROIS}(t) = 1 / (1 + \exp(-a * (t - t_i)))$$

$$SEN(t)=1/(1+\exp(-b*(t-t_s)))$$

où  $t$  est le temps en jours depuis la coupe précédente et  $M$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $t_i$  et  $t_s$  les paramètres représentant respectivement le maximum de la logistique, les pentes aux points d'inflexion de CROIS et de SEN et les temps à ces points d'inflexion (Prévo, com. pers.). Ces paramètres sont estimés sous R par la fonction `nlm` sur la base de la minimisation de la somme des carrés des écarts résiduels. Les ajustements obtenus pour chacune des parcelles en rejeon et les paramètres associés sont représentés en annexe 6.

Deux indicateurs sont extraits des ajustements du NDVI parcellaire pour les rejets de la Guadeloupe et de la Réunion. L'intégrale de l'ajustement est calculée pour l'ensemble du cycle cultural ( $\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$ ) (figure 1a) (annexe 12, programme R n°4). Le maximum du NDVI

fourni par l'ajustement est déterminé (figure 1b). A noter que ce dernier diffère du paramètre  $M$ . Le rapport  $V/R$  à la date d'obtention du maximum de NDVI est également calculé (annexe 12, programme R n°5).



**Figure 1 : Indicateurs calculés pour chaque parcelle en rejeon de la Guadeloupe et de la Réunion à partir des ajustements de NDVI au cours du cycle cultural : intégrale du NDVI (a) et maximum de NDVI (b).**



## 2.6. Modèles agronomiques de production

Deux approches de modélisation sont testées pour les dispositifs de Guadeloupe et de la Réunion sur les rejetons uniquement et en l'absence d'irrigation, le niveau de cette dernière n'étant pas connu. La production primaire nette maximale est modélisée selon le modèle empirique de Monteith simplifié pour une culture annuelle bien irriguée et fertilisée. L'élaboration du rendement en tige usinable et en sucre est ensuite simulée par le modèle MOSICAS (modèle de simulation de la croissance de la canne à sucre) intégrant l'effet du stress hydrique.

### 2.6.1. Modèle de Monteith

La production primaire nette maximale ( $PNN_{\max}$ , g m<sup>-2</sup>) est calculée sur le cycle ( $j=n$ ) à partir du rayonnement global (RG), de l'efficacité climatique ( $\epsilon_s$ ), de l'efficacité d'interception ( $f_{IPAR}$ ) et de l'efficacité maximale de conversion ( $\epsilon_{c\max}$ ) selon la formule :

$$PPN_{\max} = \sum_{j=1}^{j=n} \epsilon_{c\max} f_{IPAR} \epsilon_s RG$$

Conformément aux valeurs des paramètres utilisés dans MOSICAS (Martiné, 2003),  $\epsilon_s$  est fixé à 0.5 et  $\epsilon_{c\max}$  à 3.1 g MJ<sup>-1</sup> (annexe 12, programme R n°6).  $f_{IPAR}$  est calculé au pas de temps journalier à partir des ajustements de NDVI moyen parcellaires obtenus pour l'ensemble des rejetons de la Guadeloupe et de la Réunion (voir § 2.7.1.).

### 2.6.2. MOSICAS

MOSICAS est composé de deux modules dynamiques fonctionnant à un pas de temps journalier : un module de bilan hydrique et un module de croissance. Il est calé pour les conditions pédoclimatiques de la Réunion, et pour la variété R570 (floraison < 2 %) cultivée en repousse sur des cycles maximum de 13 mois avec un écartement proche de 1.5 m. L'écartement des rangs est similaire en Guadeloupe. Les variétés de canne de l'exploitation de Gardel diffèrent au contraire : variétés B80689, B82139, B5992, B69566 et Co6415. Les

contraintes liées à l'alimentation minérale, à l'enherbement, et aux maladies ou ravageurs ne sont pas prises en compte.

Le modèle de bilan hydrique utilisé est un modèle simplifié (WB1, pFactor). Le sol est représenté par un réservoir dont la profondeur est limitée par la zone d'enracinement. Pour le dispositif en Guadeloupe, en raison de l'absence de données de profondeur d'enracinement, la profondeur du réservoir est fixée à la profondeur de sol déterminée par méthode résistive (Remond, 2002). Les flux d'évaporation du sol et de transpiration de la plante ne sont pas séparés. L'ETM est déduite de l'ETP et du coefficient cultural ( $k_c$ ) :

$$ETM = k_c * ETP$$

L'ETR est maximale ( $ETR=ETM$ ) lorsque l'état hydrique du sol est supérieur à un point d'inflexion (pFactor). Ce dernier est estimé à 0.8 de la réserve utile dans le cas des vertisols rencontrés en Grande-Terre en Guadeloupe (Combres, com. pers.). Au delà de ce point, l'ETR diminue linéairement en fonction de l'état hydrique du sol (stock utile/réserve utile :  $swdef$ ) :

$$ETR = \min(1, (swdef / 0.8)) * ETM$$

Le bilan hydrique est initialisé en début de cycle à la moitié de la réserve utile pour les dispositifs de Guadeloupe et Réunion. Les valeurs finales de rendement sont peu sensibles aux valeurs initiales d'état hydrique du sol (Martiné, comm. pers.). Les spécificités de ces types de sol vis à vis de l'eau, en particulier leurs propriétés de retrait et de gonflement ne sont pas prises en compte dans le bilan. La réserve utile est fixée pour ces sols à 150 mm/m (Martiné, com. pers.).

Le module de croissance simule l'indice foliaire (IF) selon le formalisme 'big leaf' (Martiné, 2003). L'efficacité d'interception est calculée à partir de l'IF et d'un coefficient d'extinction par la loi de Beer Lambert. La conversion du rayonnement intercepté utile à la photosynthèse en biomasse est simulée par le modèle de Monteith. Cette biomasse est allouée aux différentes composantes dont les tiges et le sucre. L'état hydrique des tiges est simulé. Un coefficient de stress dû à la température et deux coefficients de stress hydriques sont calculés. Un seul stade phénologique exprimé en degrés jour intervient. Il s'agit de la levée ou apparition de l'IF. Les autres stades phénologiques sont exprimés en fonction des niveaux de couverture ou de

biomasse atteints. La température, le stress hydrique et la phénologie influent sur la mise en place et la sénescence de l'indice foliaire, sur l'élaboration de la biomasse totale et sur la partition de biomasse de tiges usinables entre structure et saccharose. Le rang du cycle de récolte dans le cycle de culture n'est pas représenté. Les processus de sénescence des tiges usinables ne sont pas simulés. Les paramètres utilisés pour le dispositif en Guadeloupe sont inchangés par rapport à ceux définis pour la variété R570.

Les simulations sont réalisées pour les rejets de la Guadeloupe et de la Réunion via la plateforme SIMULEX. L'apport du forçage du modèle par le  $f_{IPAR}$  ou l'IF est analysé. Ces derniers sont déterminés à partir des évolutions du NDVI moyen parcellaire (voir § 2.7.1.).

## ***2.7. Couplage du NDVI parcellaire aux modèles agronomiques de production***

Le calcul de la production primaire nette maximale selon le modèle de Monteith repose sur la détermination du  $f_{IPAR}$ . Ce dernier est calculé dans cette étude à partir du NDVI. Le NDVI est également utilisé pour forcer MOSICAS via le  $f_{IPAR}$  ou l'IF.

### **2.7.1. Calcul du $f_{IPAR}$ ou de l'IF à partir du NDVI**

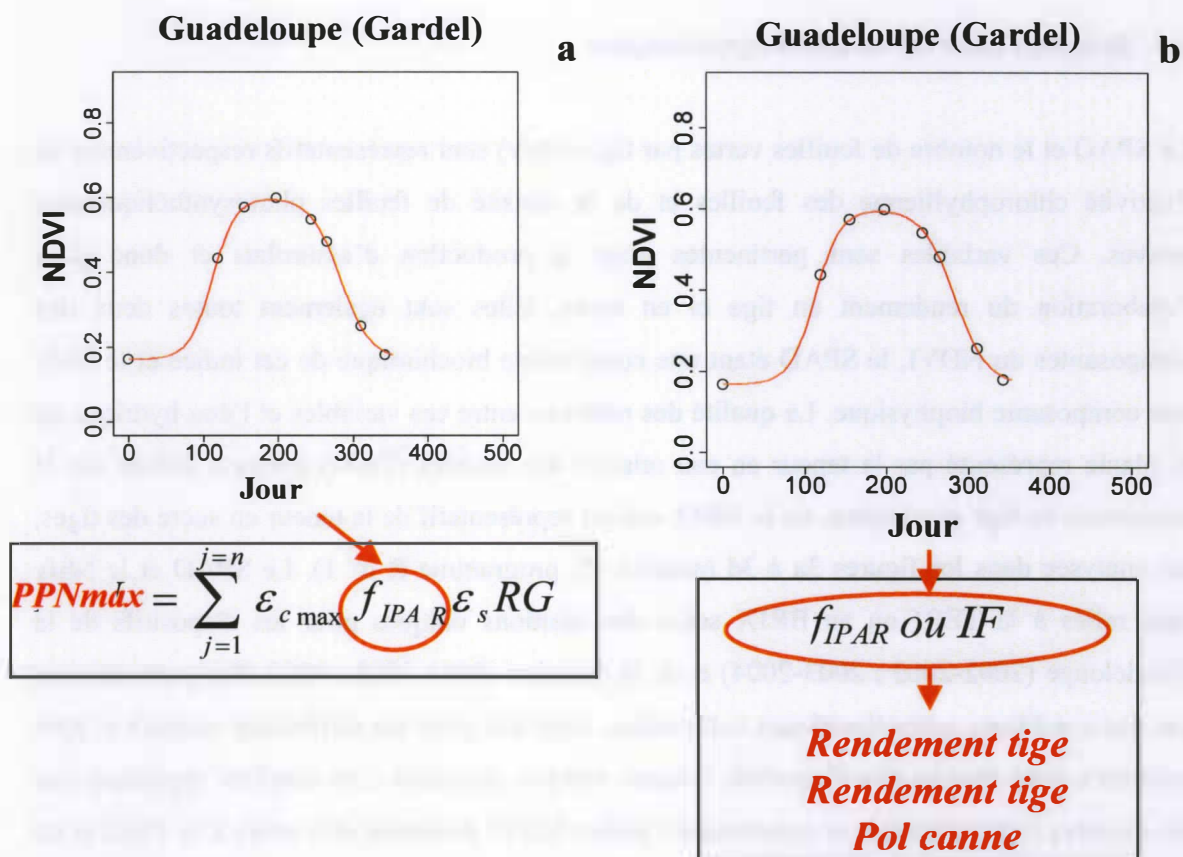
Le  $f_{IPAR}$  est calculé pour chacun des dispositifs de la Guadeloupe et de la Réunion à partir du NDVI par une régression linéaire simple. Les paramètres de cette régression sont issus pour chaque dispositif de deux points :

- i)  $f_{IPAR}$  est égal à 1 pour les deux dispositifs lorsque le NDVI atteint la valeur maximale observée au cours du cycle cultural à la Réunion : NDVI=0.8
- ii)  $f_{IPAR}$  est nul lorsque le NDVI est égal au NDVI pour les sols paillis : NDVI=0.168 et 0.226 respectivement pour la Guadeloupe et la Réunion (voir § 2.5.).

Pour le dispositif de la Réunion, l'IF est déduit du NDVI en utilisant les paramètres de la relation établie pour ce dispositif entre ces variables à partir de mesures au champ (Bappel et al., 2004).

### **2.7.2. Forçage des modèles de production par le $f_{IPAR}$ ou l'IF**

La production primaire nette maximale est calculée par le modèle de Monteith en utilisant les valeurs journalières de  $f_{IPAR}$  déduites des ajustements de NDVI au cours du cycle cultural pour chaque parcelle de la Guadeloupe et de la Réunion et des paramètres des régressions linéaires simples établies entre le  $f_{IPAR}$  et le NDVI (figure 2a). Le forçage de MOSICAS est également réalisé à partir valeurs journalières de  $f_{IPAR}$  pour le dispositif de la Guadeloupe (figure 2b). Pour le dispositif de la Réunion, MOSICAS est forcé par les valeurs journalières de l'IF déduites des ajustements du NDVI pour chaque parcelle et des paramètres de la régression obtenue entre le NDVI et l'IF pour ce dispositif



**Figure 2 : Forçage des modèles de production – Monteith (a), ou MOSICAS (b) – pour chaque parcelle en rejets de la Guadeloupe et de la Réunion à partir du  $f_{IPAR}$  ou de l'IF journaliers issus des ajustements de NDVI au cours du cycle cultural .**



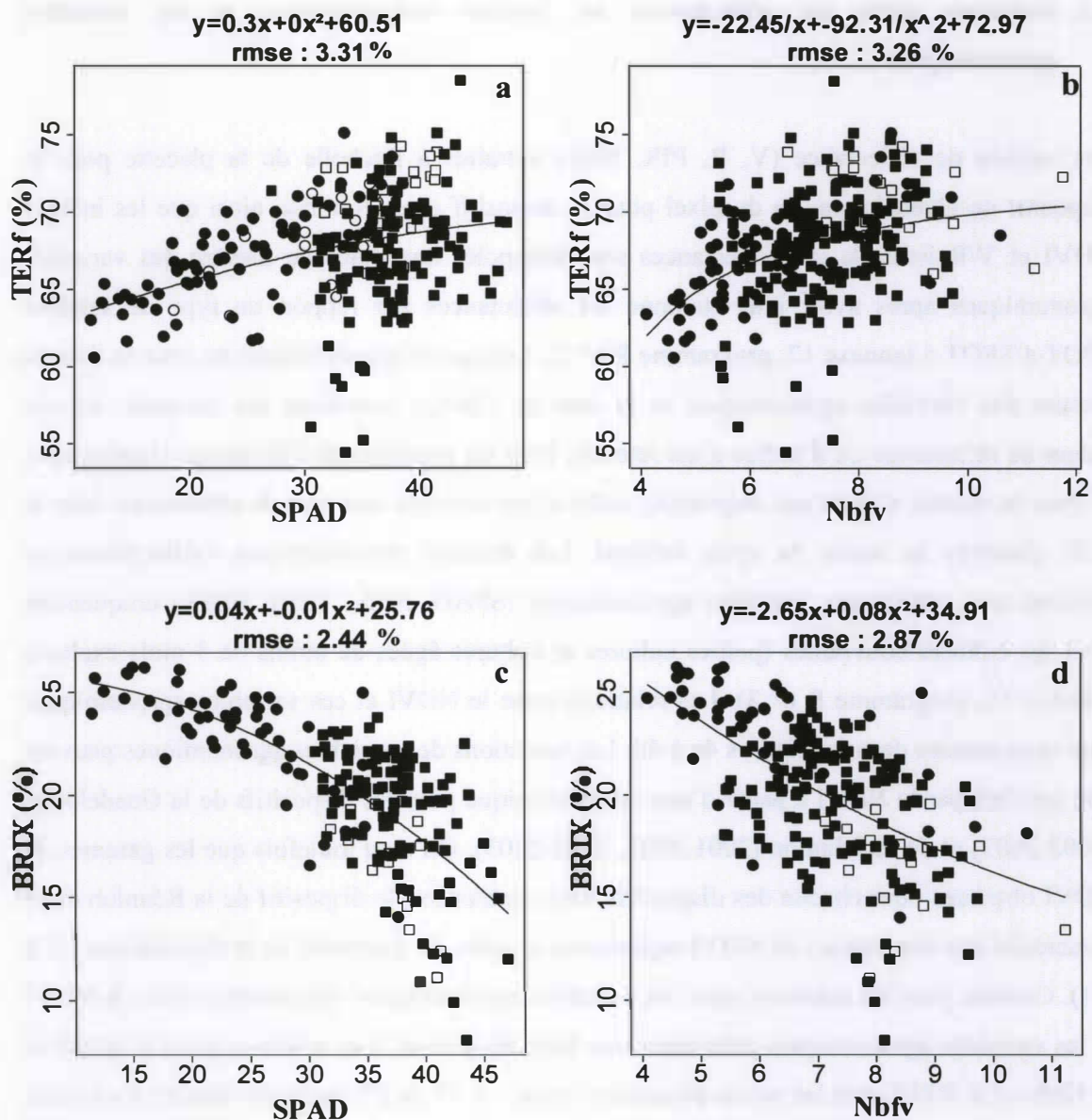
### **3. RELATIONS ENTRE LES DONNEES RADIOMETRIQUES ET LES VARIABLES AGRONOMIQUES**

Des relations sont établies entre des variables agronomiques pertinentes pour l'élaboration du rendement en tige et en sucre et composantes du NDVI pour certaines. Les relations entre les données radiométriques et ces variables sont ensuite analysées.

#### ***3.1. Relations entre les variables agronomiques***

Le SPAD et le nombre de feuilles vertes par tige (Nbfv) sont représentatifs respectivement de l'activité chlorophyllienne des feuilles et de la densité de feuilles photosynthétiquement actives. Ces variables sont pertinentes pour la production d'assimilats et donc pour l'élaboration du rendement en tige et en sucre. Elles sont également toutes deux des composantes du NDVI, le SPAD étant une composante biochimique de cet indice et le Nbfv une composante biophysique. La qualité des relations entre ces variables et l'état hydrique de la plante représenté par la teneur en eau relative des feuilles (TERf) pouvant influencer sur le rendement en tige et en sucre, ou le BRIX qui est représentatif de la teneur en sucre des tiges, est analysée dans les figures 3a à 3d (annexe 12, programme R n° 1). Le SPAD et le Nbfv sont reliés à la TERf ou au BRIX selon des relations uniques pour les dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 ; 2003-2004) et de la Réunion (2001-2002 ; 2002-2003) caractérisés par des conditions pédoclimatiques contrastées, ainsi que pour les différentes variétés et âges culturaux pour chacun des dispositifs (cannes vierges, rejets). Ces résultats suggèrent que les données radiométriques et notamment l'indice NDVI devraient être reliés à la TERf et au BRIX. La variabilité des relations reste toutefois élevée. La relation entre le SPAD et le BRIX présente le plus faible taux d'erreur (rmse = 2.44 %).



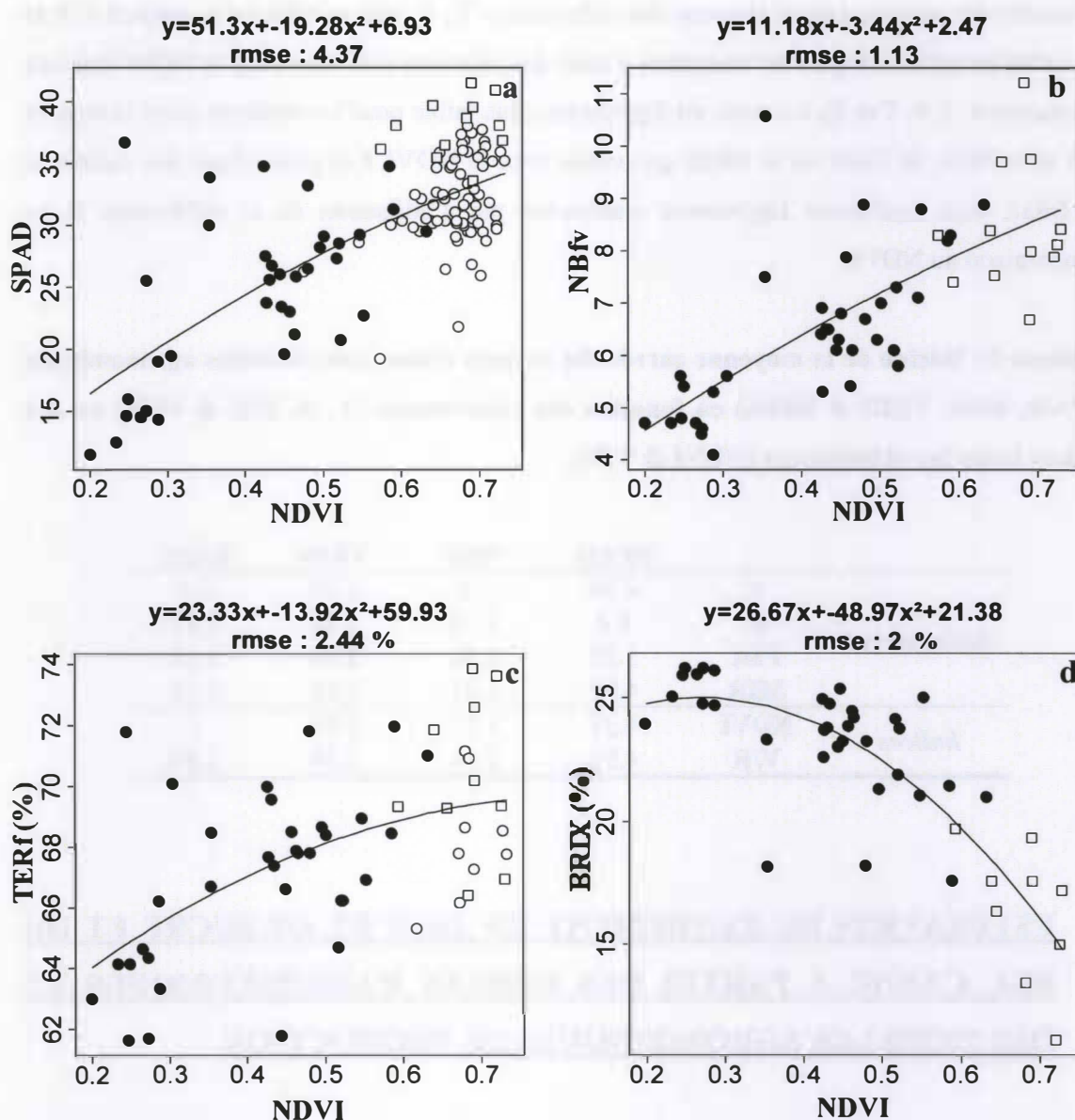


**Figure 3 : Teneur en eau foliaire (TERf %) ou BRIX (%) en fonction du SPAD (respectivement a et c) ou du nombre de feuilles vertes (Nbfv) (respectivement b et d) pour les dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●) , 2003-2004 (■) ) et de la Réunion (2001-2002 (○), 2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une placette. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.

### ***3.2. Relations entre les réflectances ou indices radiométriques et les variables agronomiques***

Les valeurs de réflectance (V, R, PIR, MIR) extraites à l'échelle de la placette pour le dispositif de Guadeloupe, ou du pixel pour le dispositif de la Réunion ainsi que les indices NDVI et V/R issus de ces réflectances sont interpolés aux dates de mesure des variables agronomiques après avoir inter-étalonné les réflectances par rapport au type de satellite SPOT 4/SPOT 5 (annexe 12, programme R n° 2). Lorsque la récolte intervient entre la date de mesure des variables agronomiques et la date de l'image succédant ces mesures, aucune valeur de réflectance ou d'indice n'est retenue. Pour les parcelles de l'Ecluse en Guadeloupe, la date de récolte n'étant pas disponible, celle-ci est associée aux pics de réflectance dans le MIR observés au cours du cycle cultural. Les données radiométriques (réflectances ou indices) sont reliées aux variables agronomiques (SPAD, Nbfv, TERf, BRIX) uniquement pour les cultures couvrantes (petites cultures et cultures âgées de moins de 3 mois exclues) (annexe 12, programme R n° 3). Les relations entre le NDVI et ces variables agronomiques sont représentées dans les figures 4a à 4d. Les variations des variables agronomiques peuvent être prédites par le NDVI à partir d'une relation unique pour les dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003) et de la Réunion (2001-2002, 2002-2003). On note toutefois que les gammes de NDVI obtenues pour chacun des dispositifs sont contrastées, le dispositif de la Réunion étant caractérisé par des valeurs de NDVI supérieures à celles du dispositif de la Guadeloupe (cf § 4.1). Comme pour les relations entre les variables agronomiques, les relations entre le NDVI et les variables agronomiques présentent une forte dispersion. Les relations entre le NDVI et le Nbfv ou le BRIX sont les moins dispersées (rmse = 1.13 et 2 % respectivement). La qualité de ces deux dernières relations souligne les potentialités du NDVI pour estimer le rendement en tige et en sucre.



**Figure 4 : SPAD, nombre de feuilles vertes (Nbfv), teneur en eau foliaire (TERf %) ou Brix (%) en fonction du NDVI (respectivement a, b, c et d) pour les rejets couvrants uniquement des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●) ) et de la Réunion (2001-2002 (○), 2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une placette. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.

La qualité des relations entre chacune des réflectances V, R, PIR et MIR ou le rapport V/R et les variables agronomiques est comparée à celle des relations obtenues avec le NDVI (tableau 3, annexes 4, 5, 6, 7 et 8). La rmse est légèrement plus faible pour les relations entre le rapport V/R et le Nbfv, la TERf ou le BRIX que celles avec le NDVI. Les prédictions des variations de BRIX sont également légèrement améliorées par l'utilisation de la réflectance R en comparaison au NDVI.

**Tableau 3 : Racine de la moyenne carrée des erreurs (rmse) des variables agronomiques (SPAD, Nbfv, TERf & BRIX) en fonction des réflectances (V, R, PIR & MIR) ou des indices issus des réflectances (NDVI & V/R).**

		SPAD	Nbfv	TERf	BRIX
<i>Réflectances</i>	<b>V</b>	4.96	1.4	2.78	2.5
	<b>R</b>	4.4	1.15	2.50	1.92
	<b>PIR</b>	5.29	1.36	2.56	3.11
	<b>MIR</b>	4.92	1.31	2.65	2.18
<i>Indices</i>	<b>NDVI</b>	4.37	1.13	2.44	2
	<b>V/R</b>	4.52	1.11	2.38	1.89

#### **4. ESTIMATION DU RENDEMENT EN TIGE ET EN SUCRE ET DU POL CANNE A PARTIR DES INDICES RADIOMETRIQUES ET DES MODELES AGRONOMIQUES DE PRODUCTION**

Les ajustements de NDVI parcellaire au cours du cycle cultural des rejets de la Guadeloupe et de la Réunion sont analysés. Les variables de production (rendement en tige et en sucre et pol canne) sont reliées aux indicateurs de développement issus de ces ajustements (maximum de NDVI et intégrale du NDVI pour l'ensemble du cycle cultural -  $\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$ ) ou au rapport

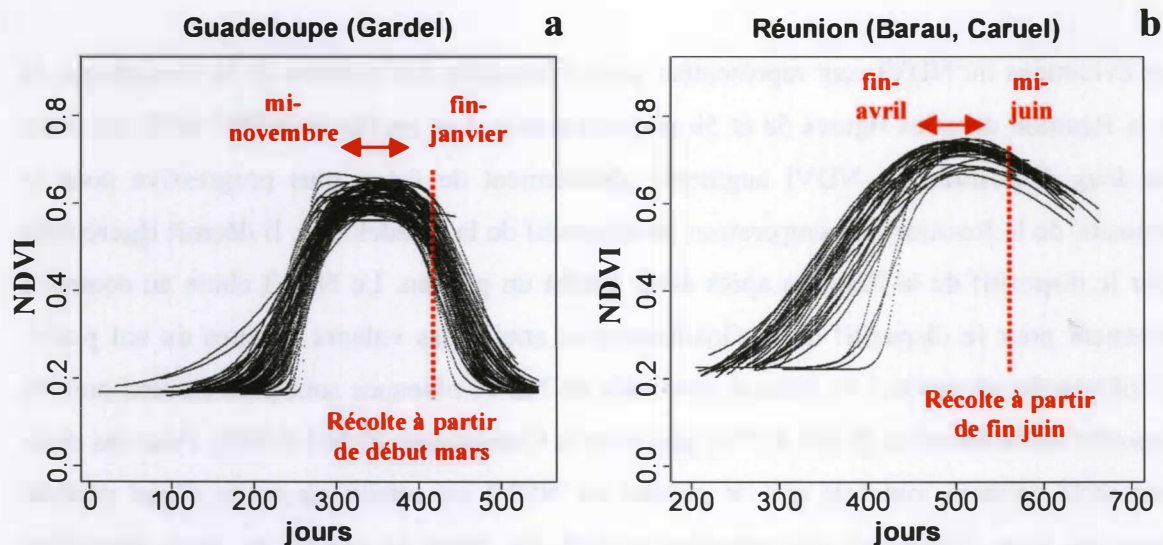
V/R calculé à la date du maximum NDVI ( $V/R_{\text{date max. NDVI}}$ ). Les relations obtenues sont comparées aux relations entre ces variables de production et la production primaire nette maximale calculée selon le modèle de Monteith à partir ajustements de NDVI, ou les mêmes variables simulées par MOSICAS avec ou sans forçage par le NDVI.



#### **4.1. Evolutions du NDVI parcellaire au cours du cycle cultural**

Les évolutions du NDVI sont représentées pour l'ensemble des rejets de la Guadeloupe et de la Réunion dans les figures 5a et 5b respectivement. Les profils de NDVI diffèrent entre ces deux dispositifs. Le NDVI augmente globalement de façon plus progressive pour le dispositif de la Réunion en comparaison au dispositif de la Guadeloupe. Il décroît légèrement pour le dispositif de la Réunion après avoir atteint un plateau. Le NDVI chute au contraire fortement pour le dispositif de la Guadeloupe et atteint des valeurs proches du sol paillis (0.168) en fin de cycle. Les valeurs maximale de NDVI obtenues sont plus élevées pour le dispositif de la Réunion [0.621-0.750] que pour la Guadeloupe [0.561-0.668]. Pour les deux dispositifs on note toutefois que le plateau de NDVI est atteint au cours d'une période commune pour l'ensemble des parcelles malgré des dates de récolte au cycle précédent s'échelonnant sur plusieurs mois (du 10/01/2002 au 27/07/2002 en Guadeloupe et du 08/07/2002 au 02/12/2002 à la Réunion). Pour le dispositif de la Guadeloupe, le plateau est obtenu entre la mi-novembre et la fin janvier, soit plus de deux mois avant le début de la récolte (début mars). Pour le dispositif de la Réunion, le NDVI plafonne de fin avril jusqu'à la mi-juin. La récolte débute fin juin pour ce dernier. Pour la majorité des parcelles des deux dispositifs (100 et 75% respectivement en Guadeloupe et à la Réunion) le maximum de NDVI est atteint plus d'un mois avant la récolte. Ce dernier constitue par conséquent un indicateur potentiellement intéressant pour prédire les variations de la production. La qualité des relations entre ce dernier et les variables de production est analysée ci-dessous.





**Figure 5 : Ajustements du NDVI au cours du cycle cultural (2002-2003) pour l'ensemble des rejets de la Guadeloupe (a) et de la Réunion (b).**

Les paramètres et la valeur de rmse obtenus pour chacun des ajustements se trouvent en annexe 11.

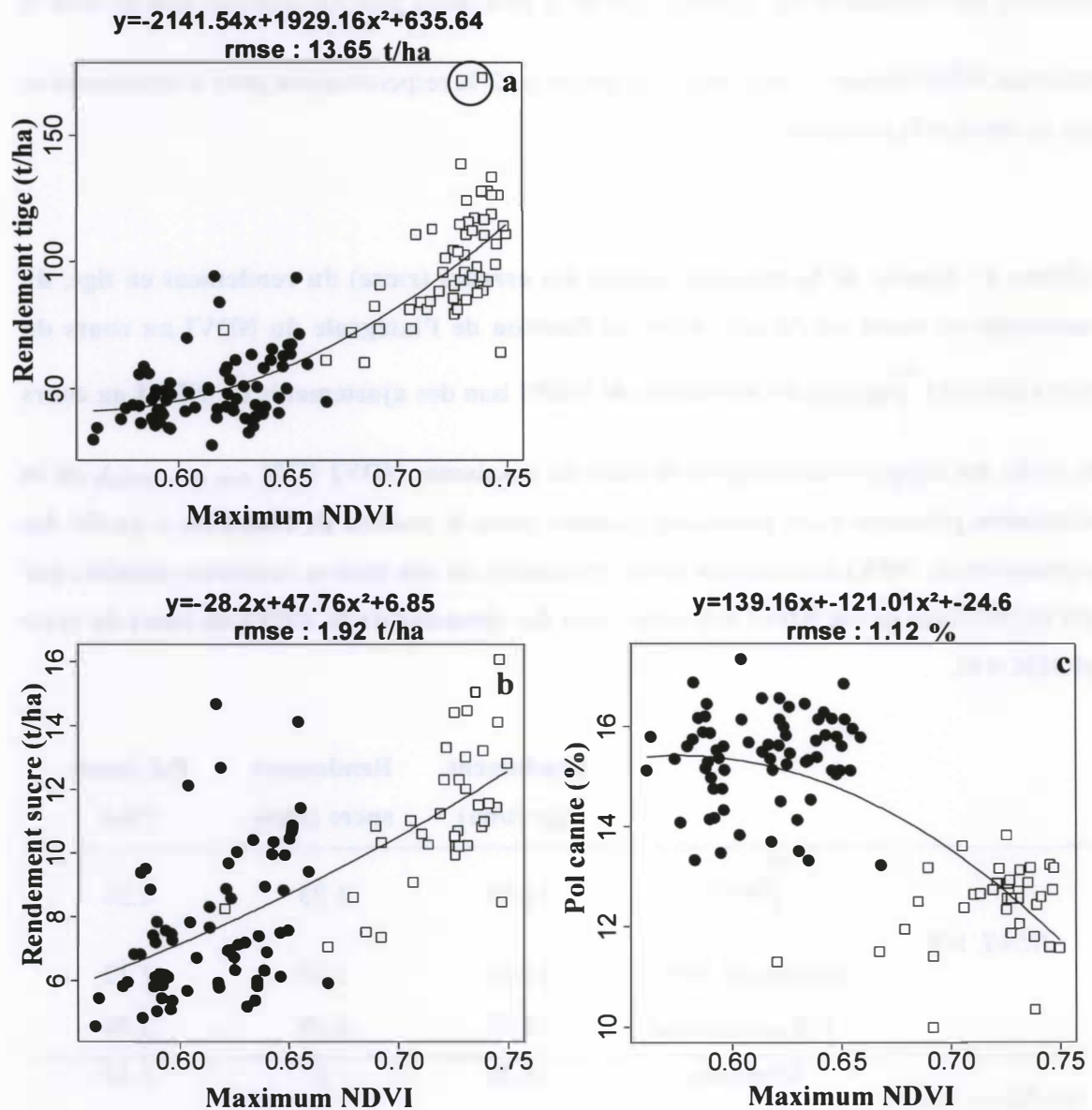
#### **4.2. Variables de récolte en fonction des indicateurs de développement**

Le maximum de NDVI et l'intégrale de NDVI pour l'ensemble du cycle cultural ( $\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$ ) issu des ajustements de NDVI ainsi que le rapport V/R calculé à la date du maximum NDVI ( $V/R_{\text{date max. NDVI}}$ ) sont reliés au rendement en tige, en sucre et au pol canne pour les dispositifs de la Guadeloupe et de la Réunion (figure 6, annexes 9 et 10). L'ensemble des variables de production peut être estimé par chacun des ces indicateurs de développement par une relation unique pour les dispositifs de la Guadeloupe et de la Réunion. Les gammes contrastées de NDVI ne permettent pas de comparer les dispositifs entre eux. Les relations obtenues avec  $V/R_{\text{date max. NDVI}}$  montrent des valeurs de rendement en tige supérieure pour la Réunion et des valeurs de pol canne inférieure pour ce même dispositif. Les relations entre cet indicateur et les variables de production sont les plus dispersées (tableau 4). La rmse est

améliorée par l'utilisation de  $\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$ . Elle est la plus faible pour les relations établies avec le maximum NDVI (rmse = 13.65 t/ha, 1.92 t/ha et 1.12 % respectivement pour le rendement en tige, en sucre et le pol canne).

**Tableau 4 : Racine de la moyenne carrée des erreurs (rmse) du rendement en tige, du rendement en sucre ou du pol canne en fonction de l'intégrale du NDVI au cours du cycle cultural ( $\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$ ), du maximum de NDVI issu des ajustements du NDVI au cours du cycle, du rapport vert/rouge à la date du maximum NDVI ( $V/R_{\text{date max. NDVI}}$ ), de la production primaire nette maximale calculée selon le modèle de Monteith à partir des ajustements de NDVI au cours du cycle (Monteith) ou des mêmes variables simulées par MOSICAS forcé par le NDVI journalier issu des ajustements de NDVI au cours du cycle (MOSICAS).**

		<b>Rendement tige (t/ha)</b>	<b>Rendement sucre (t/ha)</b>	<b>Pol canne (%)</b>
<i>NDVI, V/R</i>	$\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$	14.33	1.93	1.24
	<b>Maximum NDVI</b>	13.65	1.92	1.12
	<b><math>V/R_{\text{date max. NDVI}}</math></b>	16.52	2.09	1.36
<i>Modèles + NDVI</i>	<b>Monteith</b>	14.26	2	1.18
	<b>MOSICAS</b>	20.12	1.98	0.96

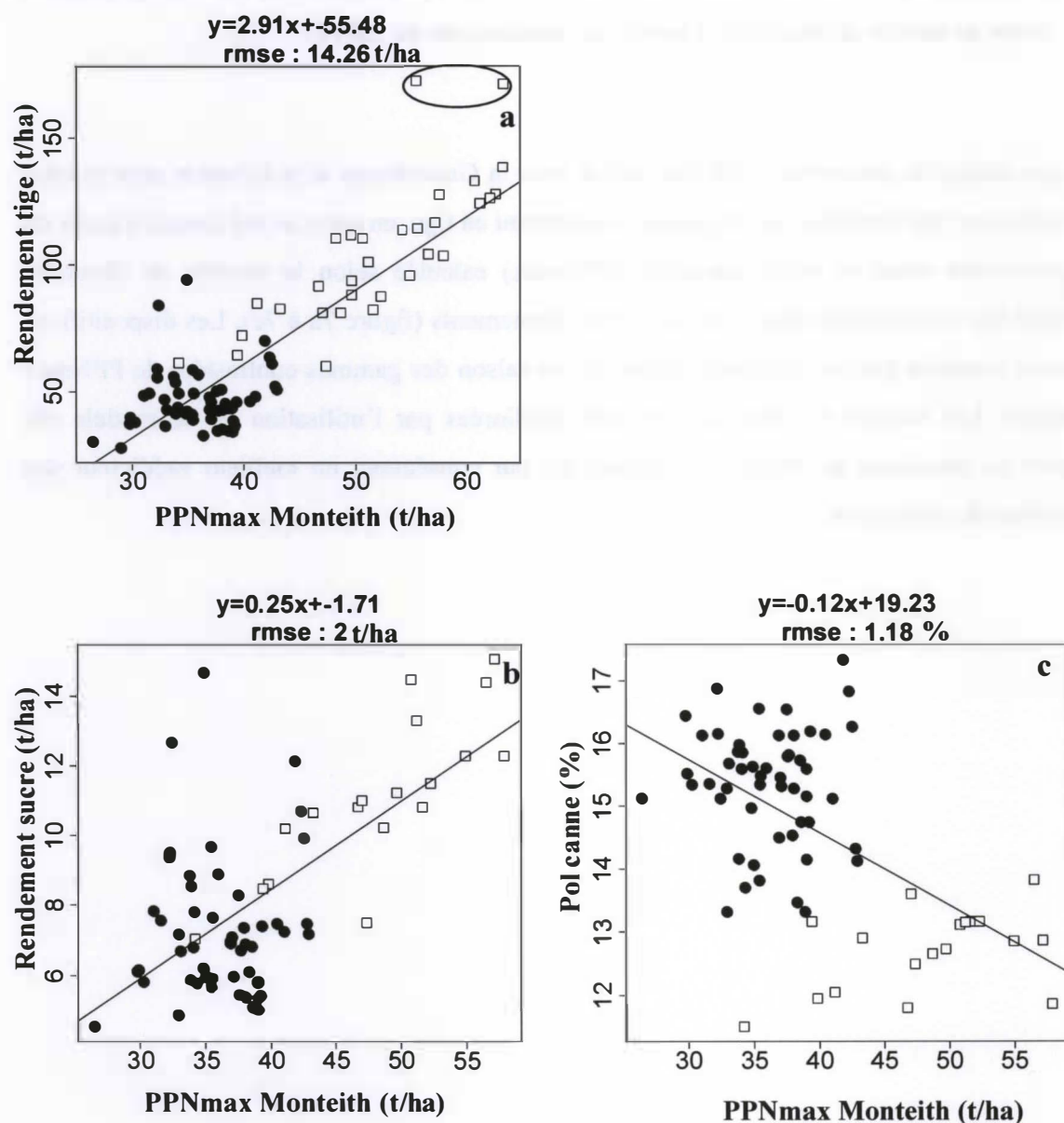


**Figure 6 : Rendement en tige, rendement en sucre ou pol canne en fonction du maximum NDVI issu des ajustements du NDVI au cours du cycle (respectivement a, b et c) pour les rejetons des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●)) et de la Réunion (2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une parcelle. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.

#### **4.3. Variables de récolte en fonction de la production primaire nette maximale calculée selon le modèle de Monteith à partir des ajustements de NDVI**

Un jeu unique de paramètres peut être utilisé pour la Guadeloupe et la Réunion pour prédire les variations des variables de production (rendement en tige, en sucre et pol canne) à partir de la production primaire nette maximale (PPNmax) calculée selon le modèle de Monteith utilisant les valeurs journalières de NDVI des ajustements (figure 7a à 7c). Les dispositifs ne peuvent toutefois pas être comparés entre eux en raison des gammes contrastées de PPNmax obtenues. Les valeurs de rmse ne sont pas améliorées par l'utilisation de ce modèle par rapport au maximum de NDVI. Ce dernier est par conséquent un meilleur prédicteur des variations de production.



**Figure 7 : Rendement en tige, rendement en sucre ou pol canne en fonction de la production primaire nette maximale calculée selon le modèle de Monteith à partir des ajustements de NDVI au cours du cycle (respectivement a, b et c) pour les rejets des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●)) et de la Réunion (2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une parcelle. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.

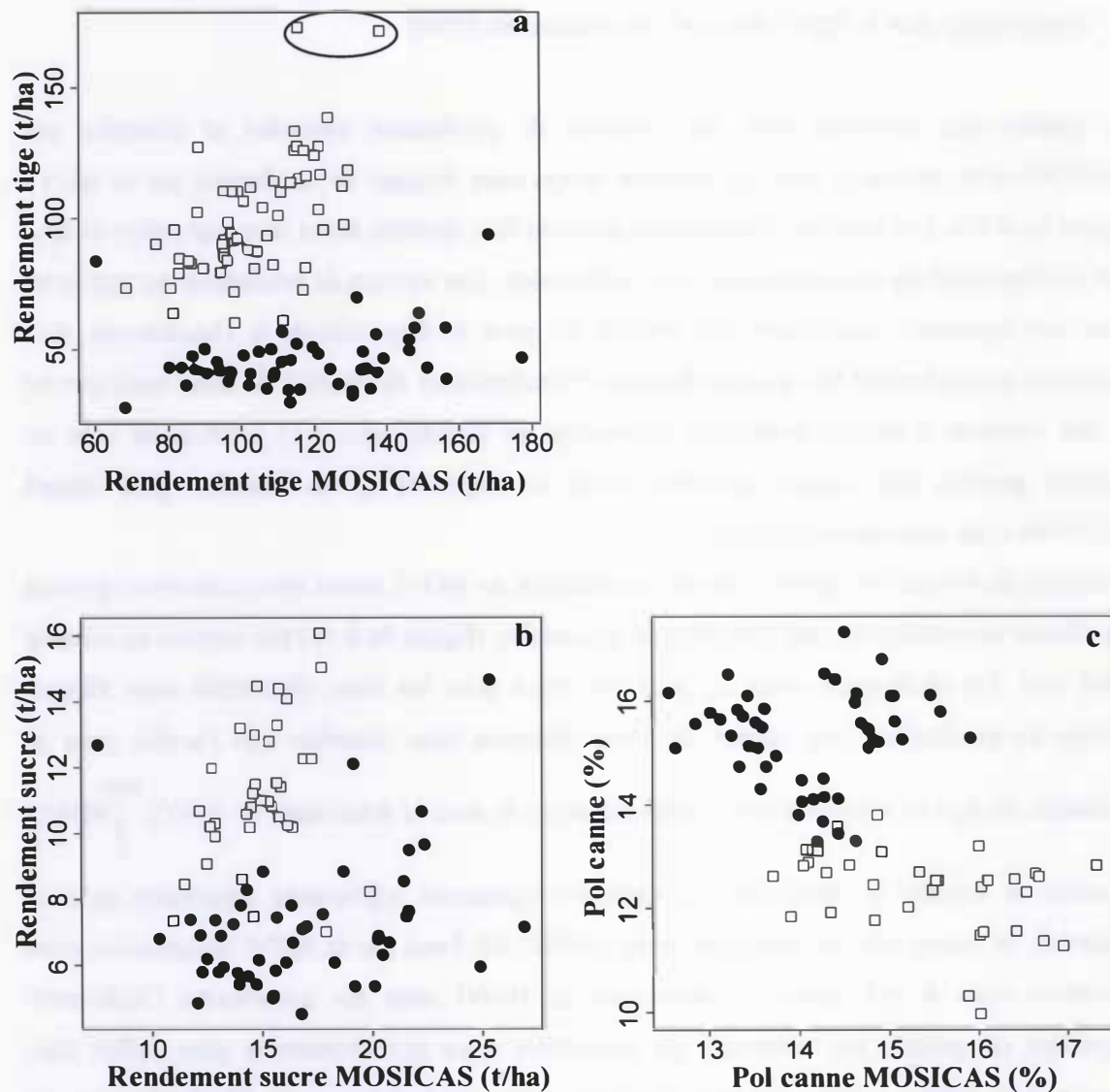


#### ***4.4. Variables de récolte en fonction des mêmes variables simulées par MOSICAS avec ou sans forçage par le NDVI issu des ajustement de NDVI***

Les qualités des relations entre les variables de production mesurées et simulées par MOSICAS sont analysées dans un premier temps sans forçage de ce dernier par le NDVI (figures 8a à 8c). Les relations obtenues ne peuvent être ajustées selon une régression unique pour les dispositifs de la Guadeloupe et de la Réunion. Les valeurs de rendement en tige et en sucre sont fortement surestimées par MOSICAS pour le dispositif de la Guadeloupe. Ces écarts sont probablement liés principalement à l'inadaptation du modèle de bilan hydrique au cas des vertisols à argiles gonflantes rencontrés en Guadeloupe. Les prédictions sont au contraire proches des valeurs mesurées pour le dispositif de la Réunion pour lequel MOSICAS a été initialement paramétré.

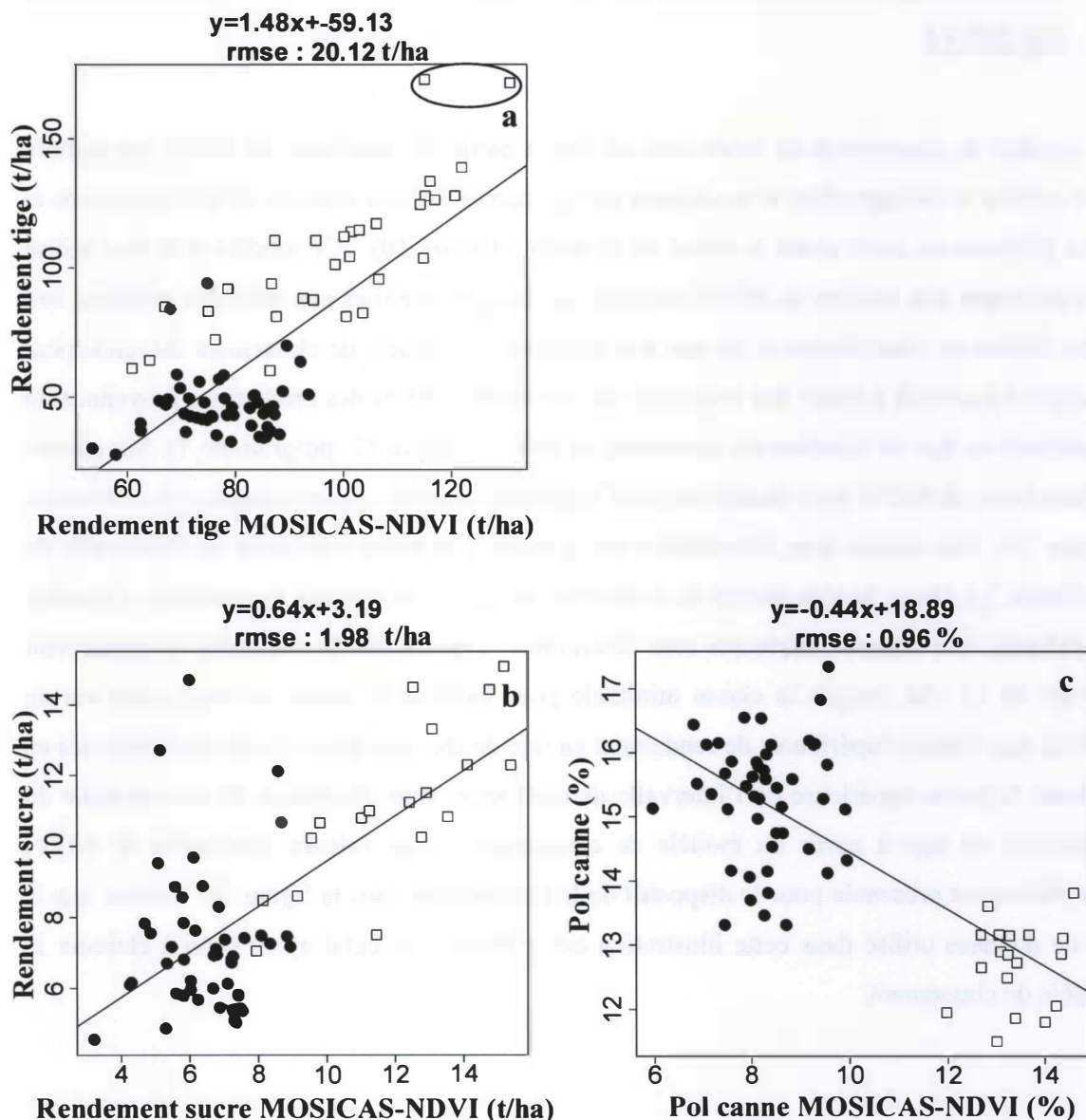
Le forçage de MOSICAS par les valeurs journalières de NDVI issues des ajustements permet d'améliorer les prédictions des variables de production (figure 9a à 9c) par rapport au modèle utilisé seul. Un ajustement commun peut être tracé pour les deux dispositifs pour chaque variable de production. Les valeurs de rmse obtenues sont toutefois très élevées pour le rendement en tige en comparaison à celles obtenues avec le maximum de NDVI,  $\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$ ,

ou même le modèle de Monteith. La rmse est également légèrement supérieure pour le rendement en sucre. Elle est améliorée avec MOSICAS forcé par le NDVI uniquement pour la relation avec le pol canne. Le maximum de NDVI reste par conséquent l'indicateur permettant de prédire les variations de production avec globalement le plus faible taux d'erreur. Les faibles valeurs de rmse obtenues avec cet indicateur de développement, sa détermination possible plus d'un mois avant la récolte et sa facilité d'accès puisqu'il est obtenu à partir des valeurs de NDVI extraites d'une seule image satellite pour chacun des dispositifs en font un indicateur de choix pour prédire les variations de production. Une illustration d'utilisation de cet indicateur pour cartographier le rendement en tige est présentée dans le § 5.



**Figure 8 : Rendement en tige, rendement en sucre ou pol canne en fonction des mêmes variables simulées par MOSICAS (respectivement a, b et c) pour les rejets des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●)) et de la Réunion (2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une parcelle.

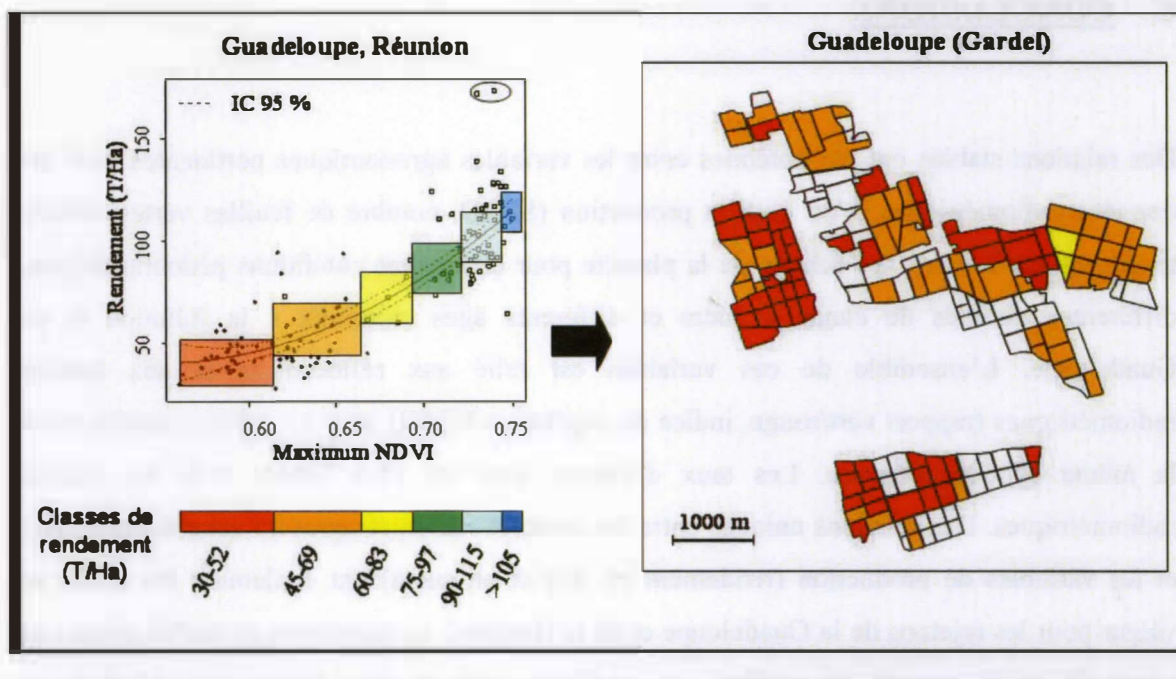


**Figure 9 : Rendement en tige, rendement en sucre ou pol canne en fonction des mêmes variables simulées par MOSICAS forcé par le NDVI journalier issu des ajustements de NDVI au cours du cycle (respectivement a, b et c) pour les rejetons des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●)) et de la Réunion (2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une parcelle. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.

## **5. CARTOGRAPHIE DU RENDEMENT A PARTIR DU MAXIMUM DE NDVI**

Un modèle de classement du rendement en tige à partir du maximum de NDVI est élaboré pour prédire et cartographier le rendement en tige parcellaire des rejets de la Guadeloupe et de la Réunion un mois avant le début de la récolte (figure 10). Ce modèle doit être utilisé conjointement aux valeurs de NDVI extraites des images satellites aux périodes requises, soit début février en Guadeloupe et fin mai à la Réunion. Le modèle de classement du rendement en tige est construit à partir des intervalles de confiance à 95 % des prédictions moyennes du rendement en tige en fonction du maximum de NDVI (annexe 12, programme 7). Six classes de maximum de NDVI sont identifiées pour la gamme obtenue en Guadeloupe et à la Réunion (figure 10). Ces classes sont déterminées sur la base de la borne inférieure de l'intervalle de confiance. La classe la plus élevée de rendement en tige correspond à des valeurs minimales de 105 t/ha. Les classes inférieures sont déterminées avec un pas de réduction du rendement en tige de 15 t/ha jusqu'à la classe minimale pour laquelle la valeur de rendement est de 30 t/ha. Les limites supérieures de rendement en tige de chacune des 6 classes sont définies en utilisant la borne supérieure de l'intervalle de confiance. Une illustration de cartographie du rendement en tige à partir du modèle de classement et des valeurs maximales de NDVI parcellaires est présentée pour le dispositif de la Guadeloupe dans la figure 10. A noter que le jeu de données utilisé dans cette illustration est le même que celui ayant servi à élaborer le modèle de classement.



**Figure 10 : Illustration de la classification des rendements en tige parcellaires à partir du maximum de NDVI obtenu sur les parcelles et du modèle de classement du rendement en tige en fonction du maximum NDVI établi pour les dispositifs de la Guadeloupe et de la Réunion.**

Les paramètres du rendement en tige en fonction du maximum NDVI se trouvent dans la figure 6a.



## **6. CONCLUSIONS**

Des relations stables ont été obtenues entre les variables agronomiques pertinentes pour les données radiométriques et/ou pour la production (SPAD, nombre de feuilles vertes, BRIX, teneur en eau foliaire) à l'échelle de la placette pour différentes conditions pédoclimatiques, différentes variétés de canne à sucre et différents âges culturaux à la Réunion et en Guadeloupe. L'ensemble de ces variables est relié aux réflectances et aux indices radiométriques (rapport vert/rouge, indice de végétation NDVI) pour les mêmes conditions et la même échelle d'espace. Les taux d'erreurs sont les plus faibles avec les indices radiométriques. Des relations uniques entre les données radiométriques à l'échelle parcellaire et les variables de production (rendement en tige et en sucre) ont également été mises en valeur pour les rejets de la Guadeloupe et de la Réunion. Le maximum de NDVI obtenu au cours du cycle permet de prédire ces variables avec le plus faible taux d'erreur en comparaison avec les autres indicateurs extraits des images temporelles (intégrale de NDVI au cours du cycle ou rapport V/R à la date du maximum de NDVI). Aucun des modèles agronomiques testés, seuls (MOSICAS) ou forcés par le NDVI (Monteith et MOSICAS), n'a permis d'améliorer les prédictions des variables de production en comparaison au maximum de NDVI. Un modèle de classement du rendement en tige à partir de cet indicateur est proposé. Ce modèle peut être utilisé de façon générale plus d'un mois avant la coupe conjointement aux données NDVI extraites d'images pour prédire le rendement en tige.

L'ensemble des relations présentées dans cette étude devra être complété avec les données récoltées au cours du cycle 2003-2004 en Guadeloupe qui est caractérisé par des conditions pluviométriques contrastées par rapport au cycle précédant (pluviométrie accrue). Des variables agronomiques supplémentaires telles que la teneur en sucre et la teneur en eau relative des tiges, la teneur en chlorophylle et la teneur en azote des feuilles ainsi que l'indice foliaire ont de plus été mesurées. La qualité des relations entre les variables agronomiques citées précédemment ou les données radiométriques et ces nouvelles variables devra être analysée. La relation entre le NDVI et l'efficacité d'interception définie de façon théorique pour le dispositif de Guadeloupe pourra être remplacée par une relation entre le NDVI et l'indice foliaire établie à partir de ces mesures sur le terrain. L'hétérogénéité intraparcelle de coupe pourra également être prise en compte afin d'améliorer les relations. L'apport d'autres indices que le NDVI et le rapport vert/rouge (ex : MSAVI, modified soil adjusted

vegetation index) pour prédire les variations des variables agronomiques et des variables de production devront être testés. Un modèle de classement du rendement en sucre à partir du maximum de NDVI ou d'autres indicateurs pourra être établi de la même façon que pour le modèle de classement du rendement en tige usinable. Les deux modèles devront alors être validés et intégrés dans le SIG.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

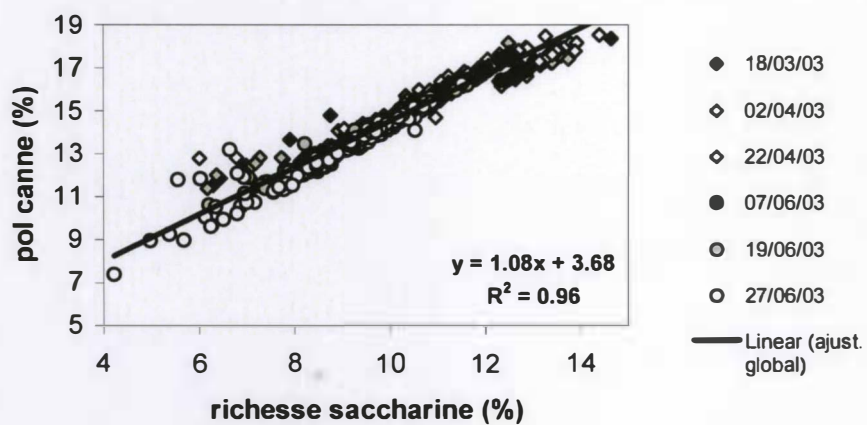
- Bappel E., Bégué, A, Martiné J.F., Pellegrino A. et Siegmund B. 2004. Assimilation in a Sugarcane yield forecasting model of biophysical parameter estimated by remote sensing using SPOT 4&5 data. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technology). 30 janvier-04 février 2005 Atagua, Guatemala.
- Bégué, 2002. Télédétection et production végétale. Habilitation à diriger des recherches. Université Pierre et Marie Curie. 109 p.
- Bégué, A., Iltis, N., Despres, G., Todoroff, P. et Siegmund, B., 2003. Analyse de l'existant et des besoins des utilisateurs à Maurice, La Réunion et Guadeloupe (Projet SUCRETTE), CIRAD, Montpellier.
- Bégué, A., Todoroff, P., Degenne, P., Baillarin, F. et Pellegrino, A., 2004. Application of remote sensing technology to monitor sugar cane cutting and planting in Guadeloupe (French West Indies), 10-14 mai 2004 GEOMATICA, Havane (Cuba).
- Catsidonis S. 2003. Caractérisation de la production cannière par télédétection - cas de la plantation de Gardel, Guadeloupe. Mémoire DESS. Université Paris 12 Val de Marne, 59 p.
- Kumar, M. et Monteith, J. L. (1981). Remote sensing of crop growth. In "Plants and the daylight spectrum." (S. H., ed.). 133-144.
- Martiné J.F. 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle. Thèse. Institut National Paris Grignon. 130 p.
- Remond J.M., 2002, Validation d'un modèle de croissance de la canne à sucre et application à l'optimisation d'un calendrier d'irrigation. Mémoire DEA. Université des Antilles et de la Guyane, 43 p.
- Ribbes, F., Bégué, A., Siegmund, B., Todoroff, P. et Autrey, L.J.C., 2002. Potentialités de la télédétection satellitaire pour la filière canne à sucre (Projet SUCRETTE). In: Stella Matutina (Editor), Conférence « Perspectives de développement de la canne à sucre en milieu insulaire : approches technico-économiques, sociales et culturelles », St Leu, La Réunion (FR).

Todoroff P. 2000. Simulation de la production de la Canne à Sucre en Guadeloupe par le modèle Simulex. 04 janvier – 27 février 2000. Rapport de mission. 30 p.

Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., et Artis, P. (1982). Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta Oecologica, Oecologia Plantarum* 3, 3-26.



## ANNEXES



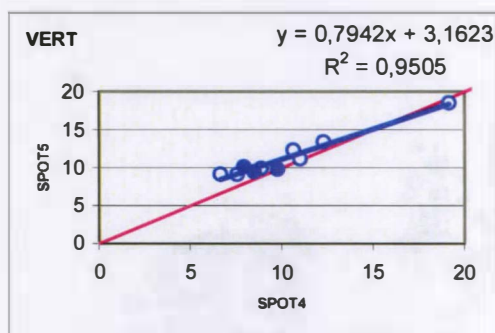
### **Annexe 1 : Polarimétrie ramenée à la masse de canne (pol canne) en fonction de la richesse saccharine.**

Les valeurs sont issues de 6 fiches de mesures fournies par le CTICS Guadeloupe à 6 dates différentes.

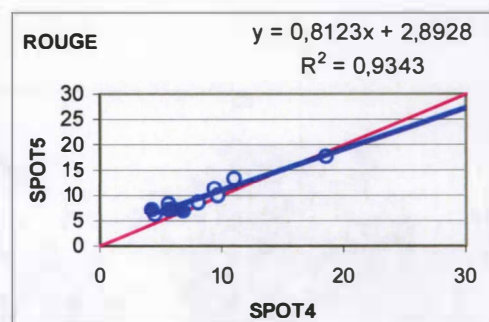




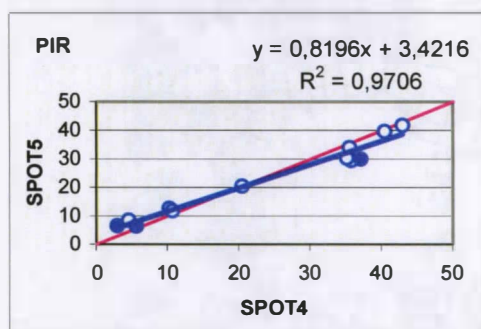
**Annexe 2 : Points GPS de mesure des variables agronomiques sur Gardel et l'Ecluse au cours du cycle 2002-2003 (a) ou 2003-2004 (b).**



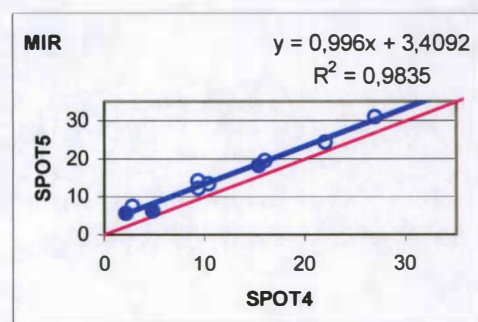
**a**



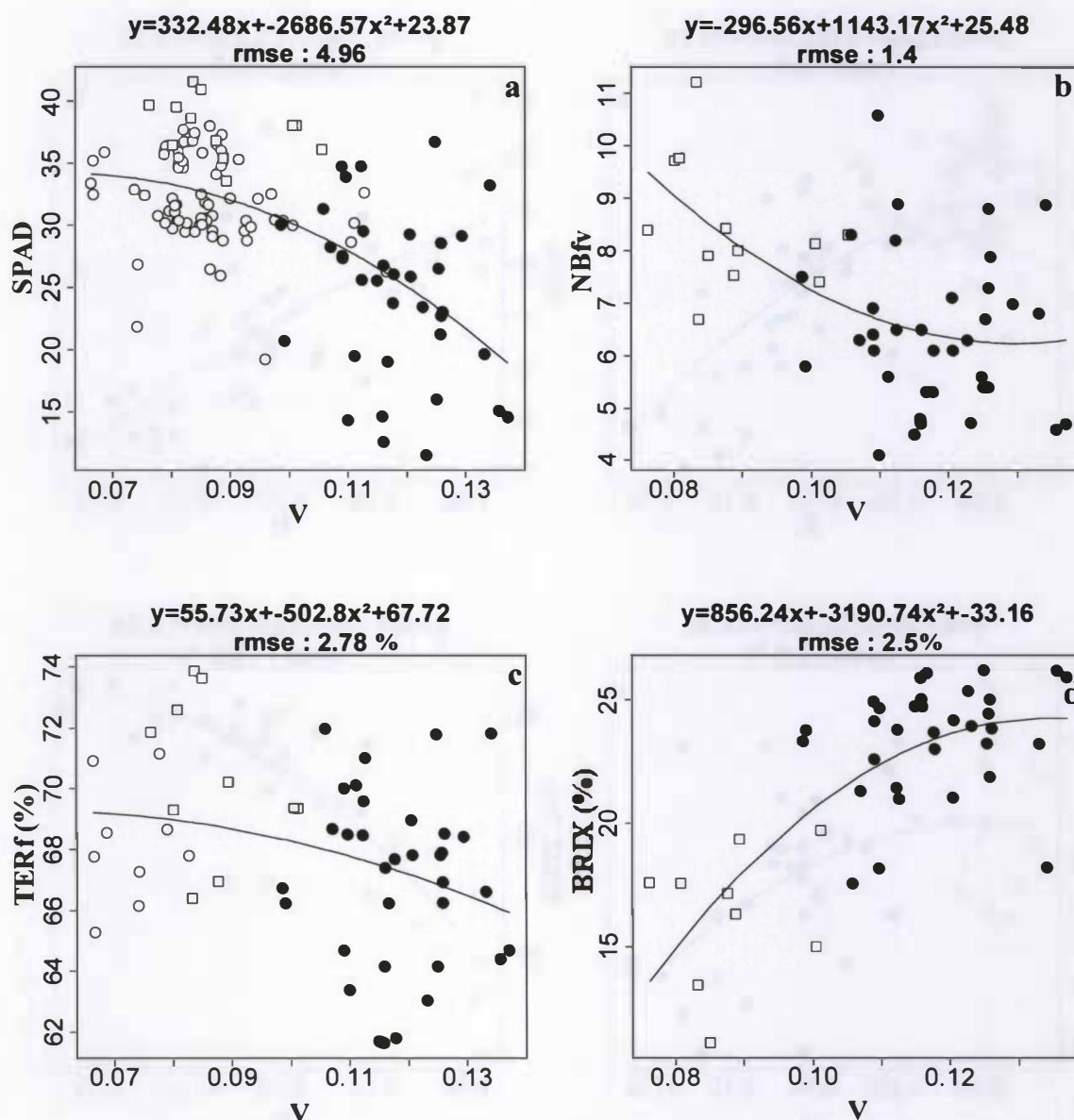
**b**



**c**

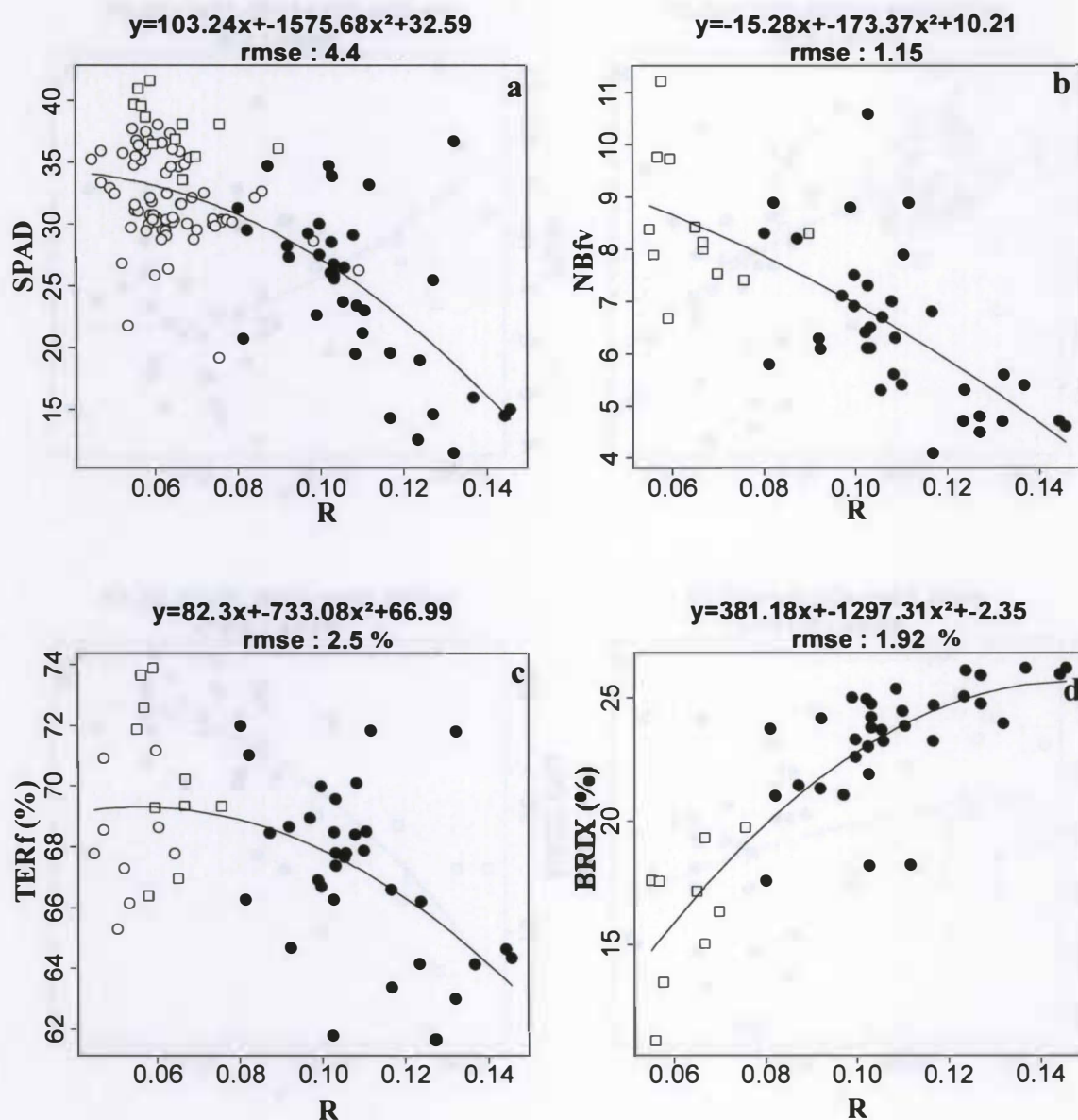


**Annexe 3 : Inter-étalonnage SPOT 4/SPOT 5 des réflectances moyennes d'invariants dans les bandes spectrales vert, rouge, proche et moyen infra-rouge (respectivement a, b, c et d) pour le dispositif de la Guadeloupe.**



**Annexe 4 : SPAD, nombre de feuilles vertes (Nbfv), teneur en eau foliaire (TERf %) ou Brix (%) en fonction de la réflectance dans le vert (V) (respectivement a, b, c et d) pour les rejets couvrants uniquement des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●) ) et de la Réunion (2001-2002 (○), 2002-2003 (□)).**

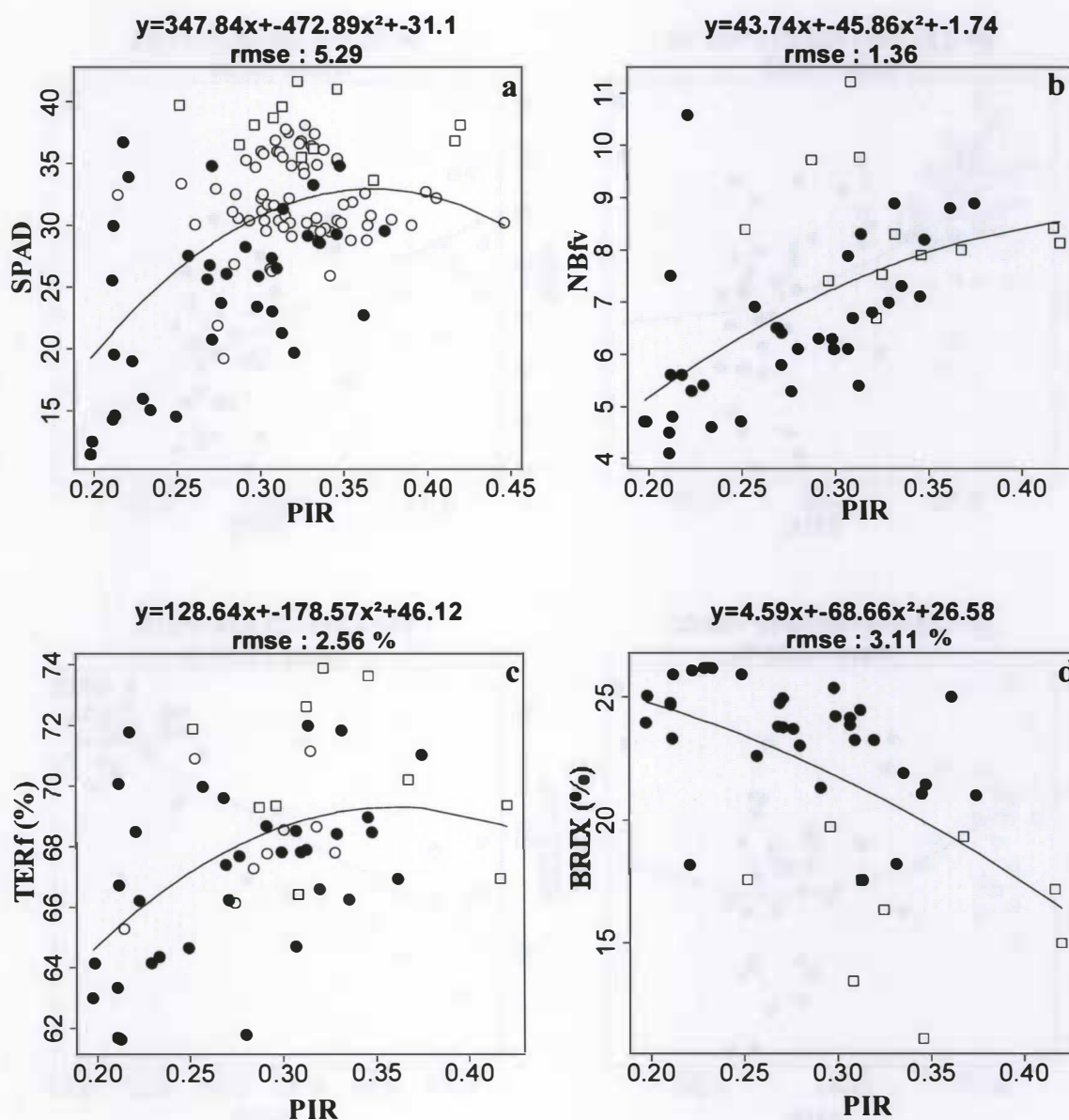
Chaque point représente une placette. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.



**Annexe 5 : SPAD, nombre de feuilles vertes (Nbfv), teneur en eau foliaire (TERf %) ou Brix (%) en fonction de la réflectance dans le rouge (R) (respectivement a, b, c et d) pour les rejets couvrants uniquement des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●) ) et de la Réunion (2001-2002 (○), 2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une placette. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.

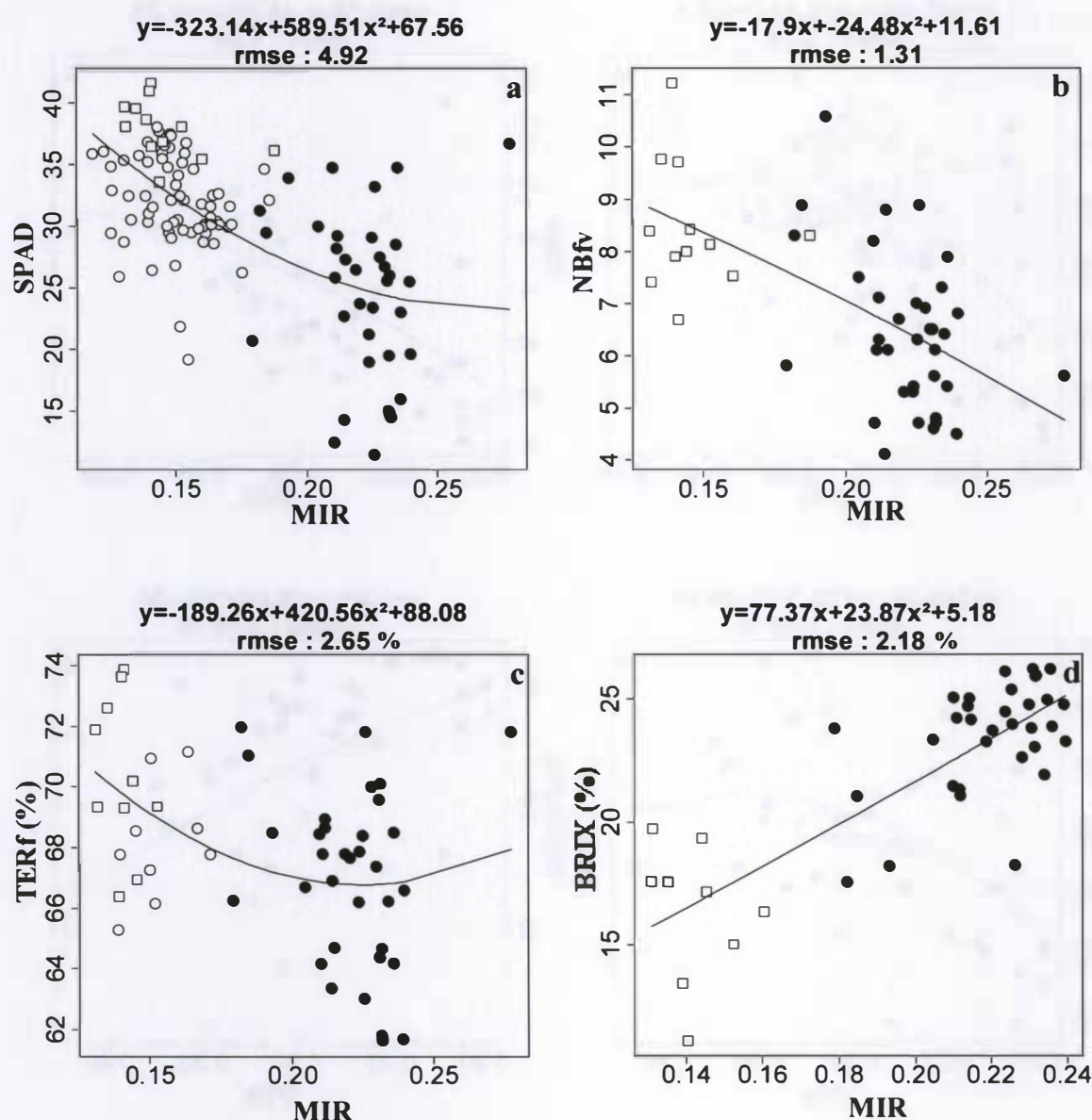




**Annexe 6 : SPAD, nombre de feuilles vertes (Nbfv), teneur en eau foliaire (TERf %) ou Brix (%) en fonction de la réflectance dans le proche infra-rouge (R) (respectivement a, b, c et d) pour les rejets couvrants uniquement des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●) ) et de la Réunion (2001-2002 (○), 2002-2003 (◻)).**

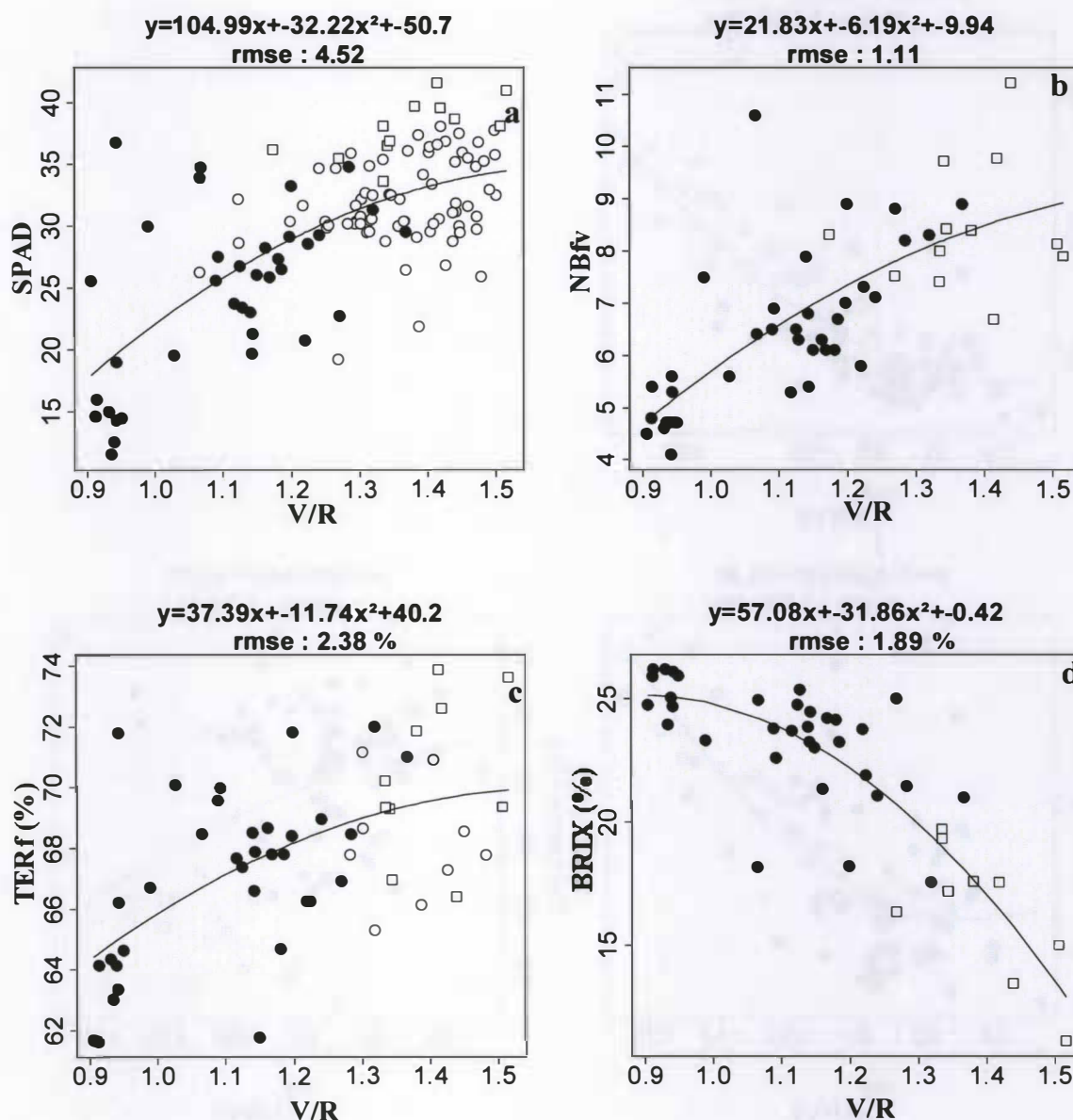
Chaque point représente une placette. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.





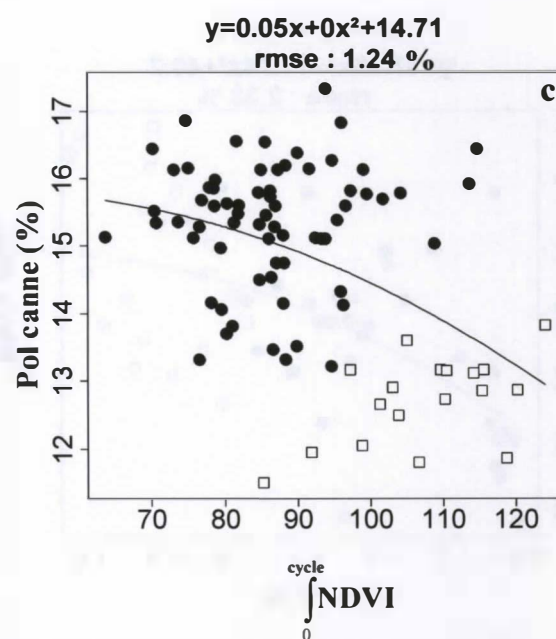
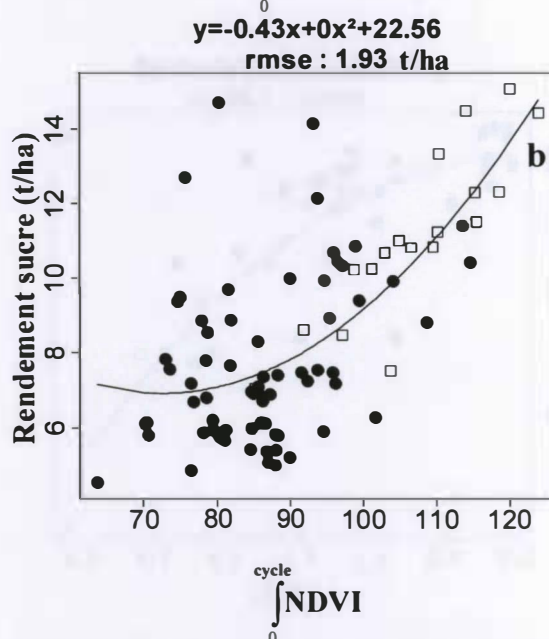
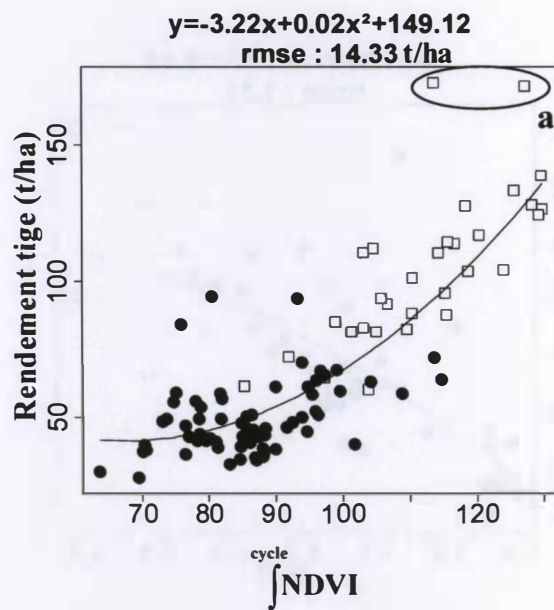
**Annexe7 : SPAD, nombre de feuilles vertes (Nbfv), teneur en eau foliaire (TERf %) ou Brix (%) en fonction de la réflectance dans le moyen infra-rouge (R) (respectivement a, b, c et d) pour les rejets couvrants uniquement des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●) ) et de la Réunion (2001-2002 (○), 2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une placette. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.



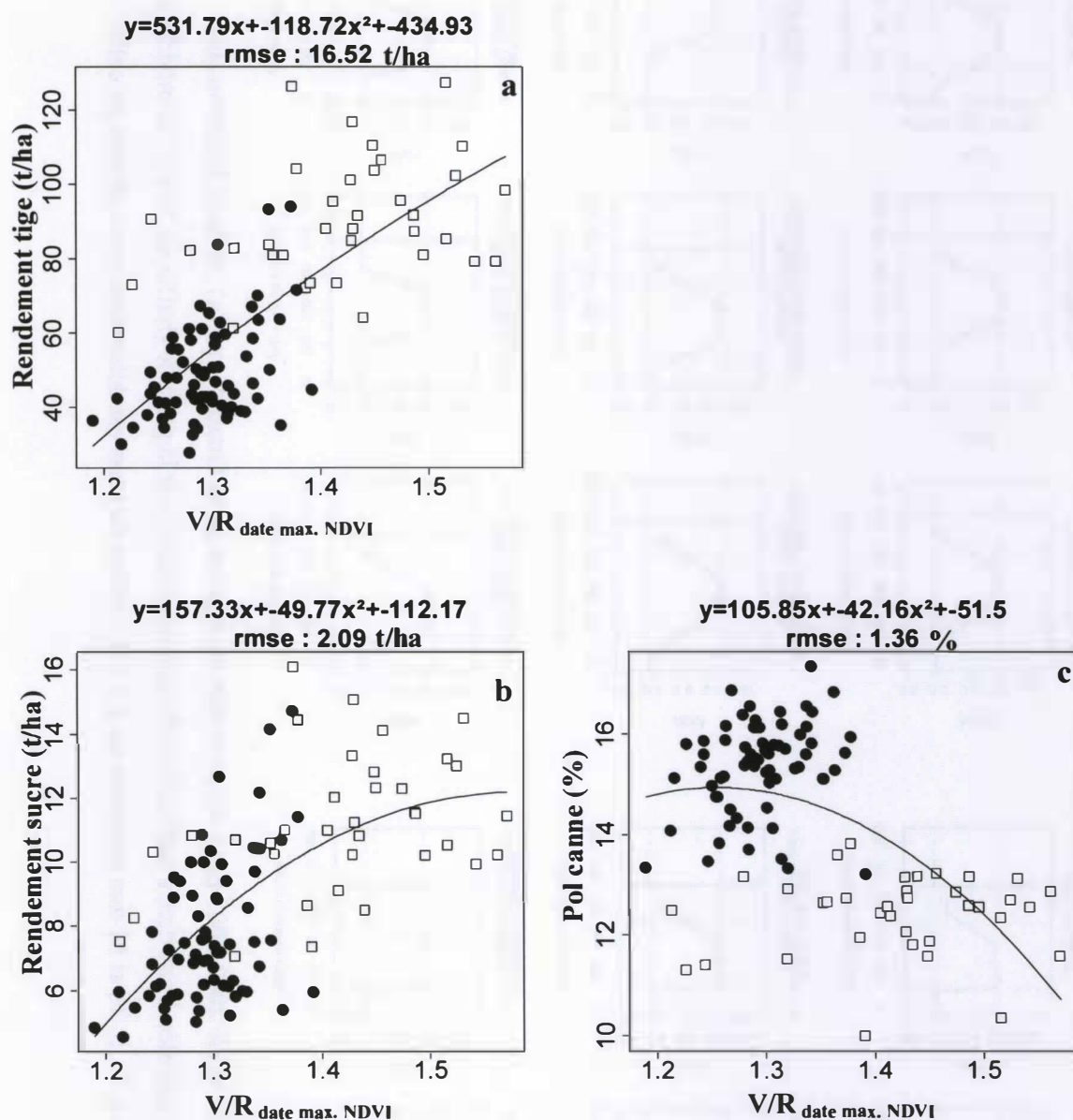
**Annexe 8 : SPAD, nombre de feuilles vertes (Nbfv), teneur en eau foliaire (TERf %) ou Brix (%) en fonction du rapport vert/rouge (V/R) (respectivement a, b, c et d) pour les rejets couvrants uniquement des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●) ) et de la Réunion (2001-2002 (◊), 2002-2003 (◻)).**

Chaque point représente une placette. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.



Annexe 9 : Rendement en tige, rendement en sucre ou pol canne en fonction de l'intégrale du NDVI au cours du cycle cultural ( $\int_0^{\text{cycle}} \text{NDVI}$ ) (respectivement a, b et c) pour les rejets des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●)) et de la Réunion (2002-2003 (□)).

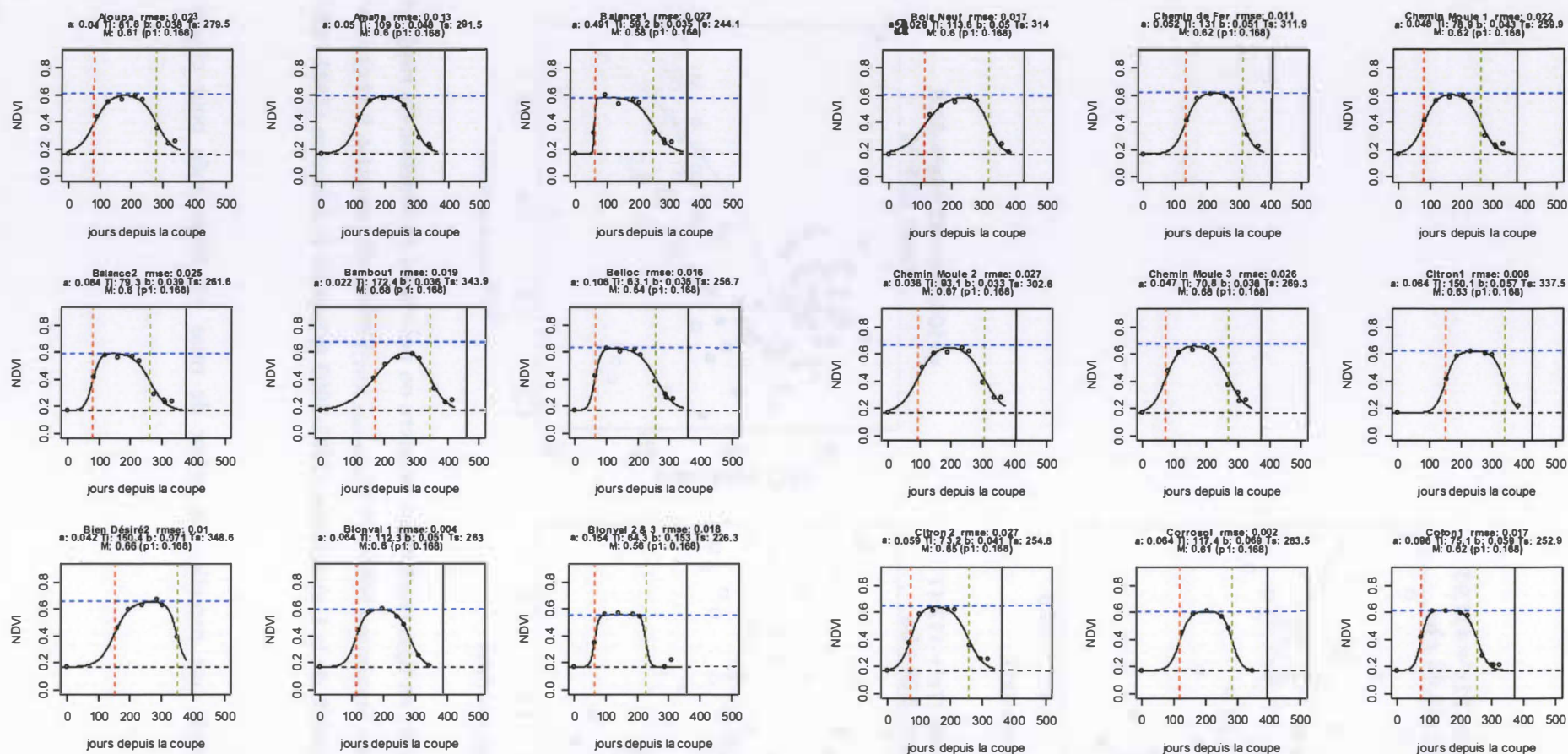
Chaque point représente une parcelle. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.



**Annexe 10 : Rendement en tige, rendement en sucre ou pol canne en fonction du rapport vert/rouge à la date du maximum NDVI ( $V/R_{\text{date max. NDVI}}$ ) (respectivement a, b et c) pour les rejets des dispositifs de la Guadeloupe (2002-2003 (●)) et de la Réunion (2002-2003 (□)).**

Chaque point représente une parcelle. La valeur de rmse est déterminée pour chaque ajustement.

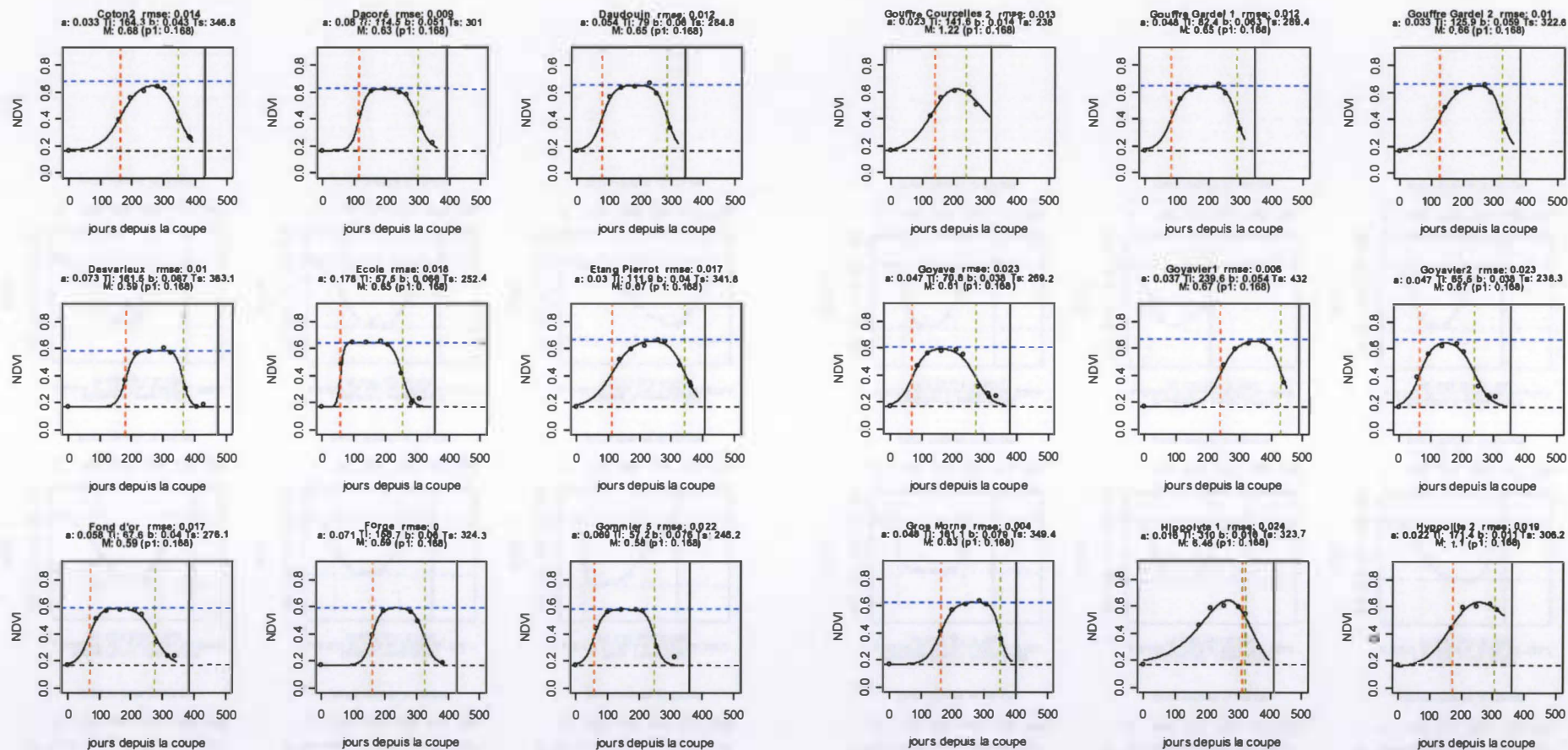


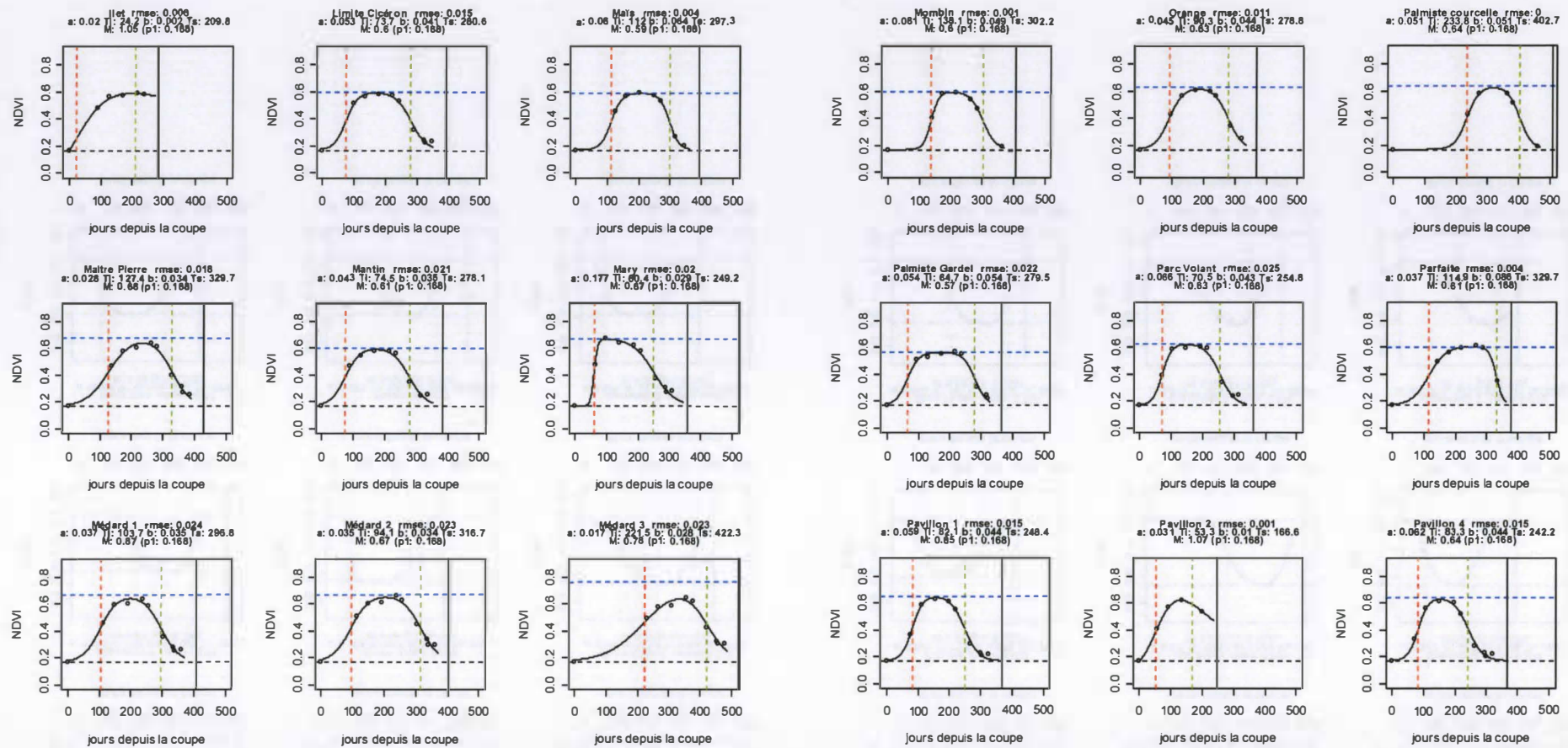


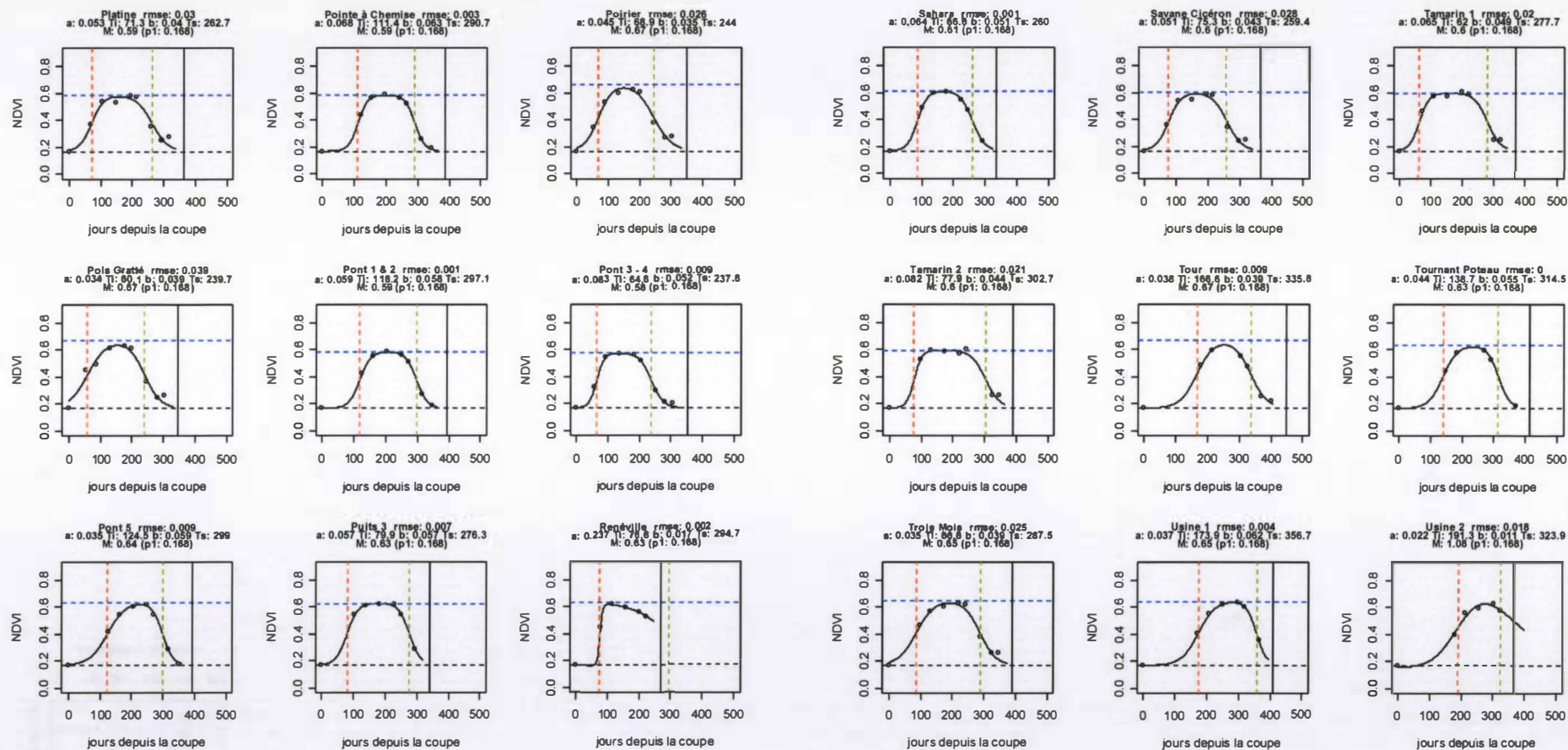
## Annexe 11 : Evolutions du NDVI au cours du cycle 2002-2003 pour les parcelles en rejets de la Guadeloupe (a) et de la Réunion (b).

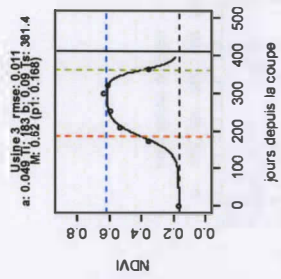
Chaque point correspond à la valeur de NDVI calculée à une date à partir des reflectances extraites sur la parcelle (buffer de 20 m). Le modèle utilisé pour l'ajustement et la signification des paramètres a,  $T_i$ , b,  $T_s$  et M sont présentés au § 2.5. La valeur de rmse est déterminée pour chaque parcelle.



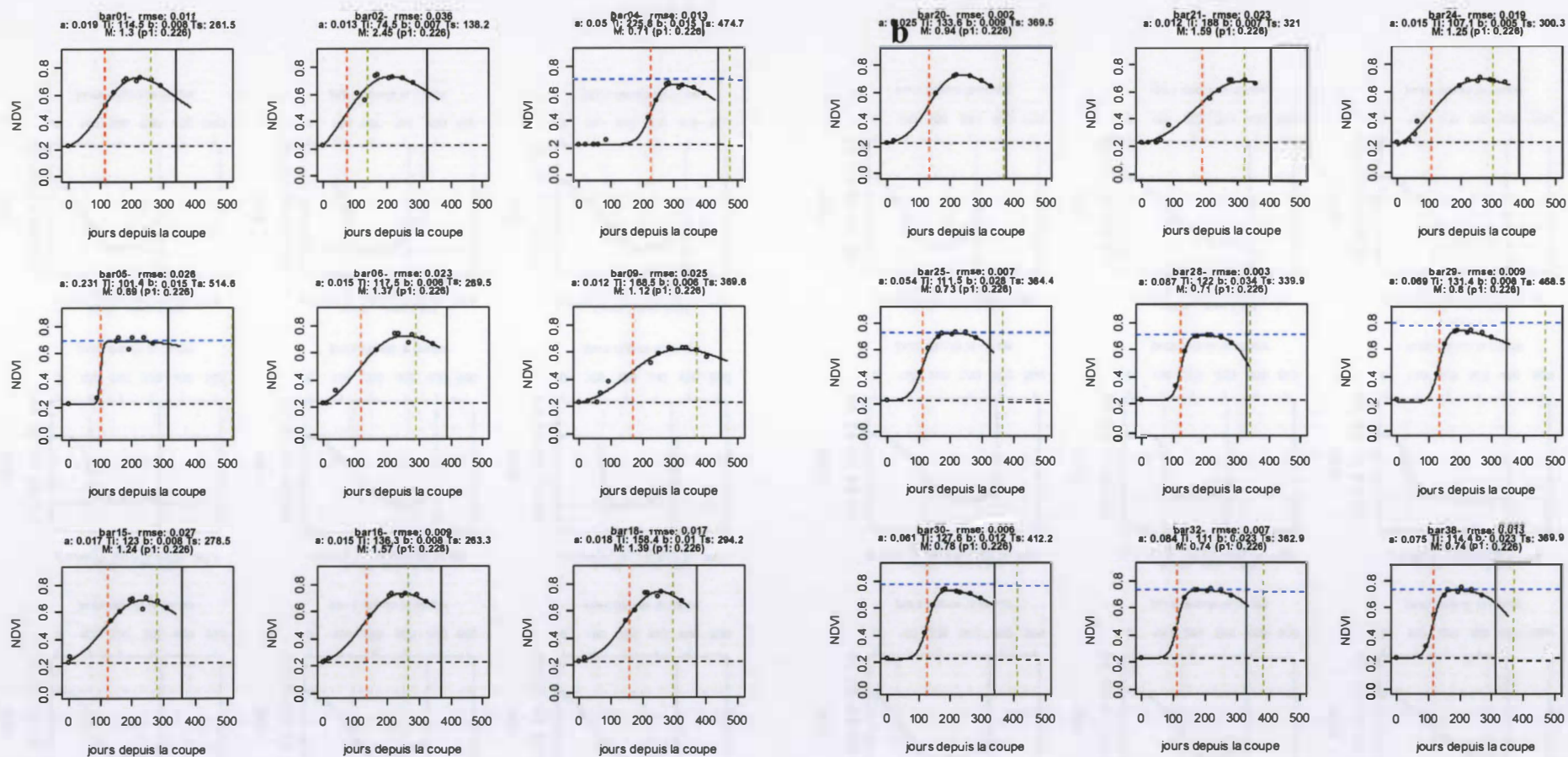




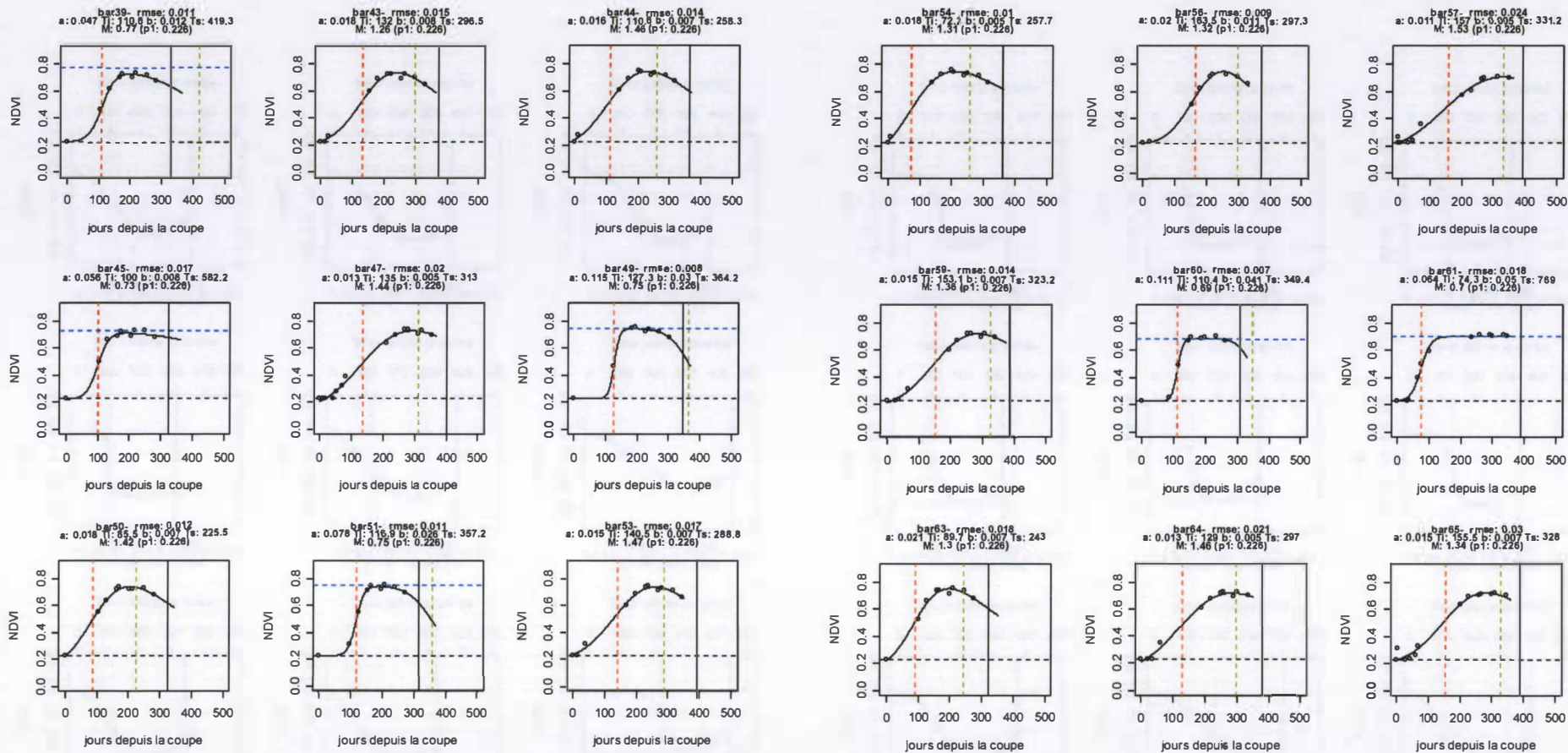


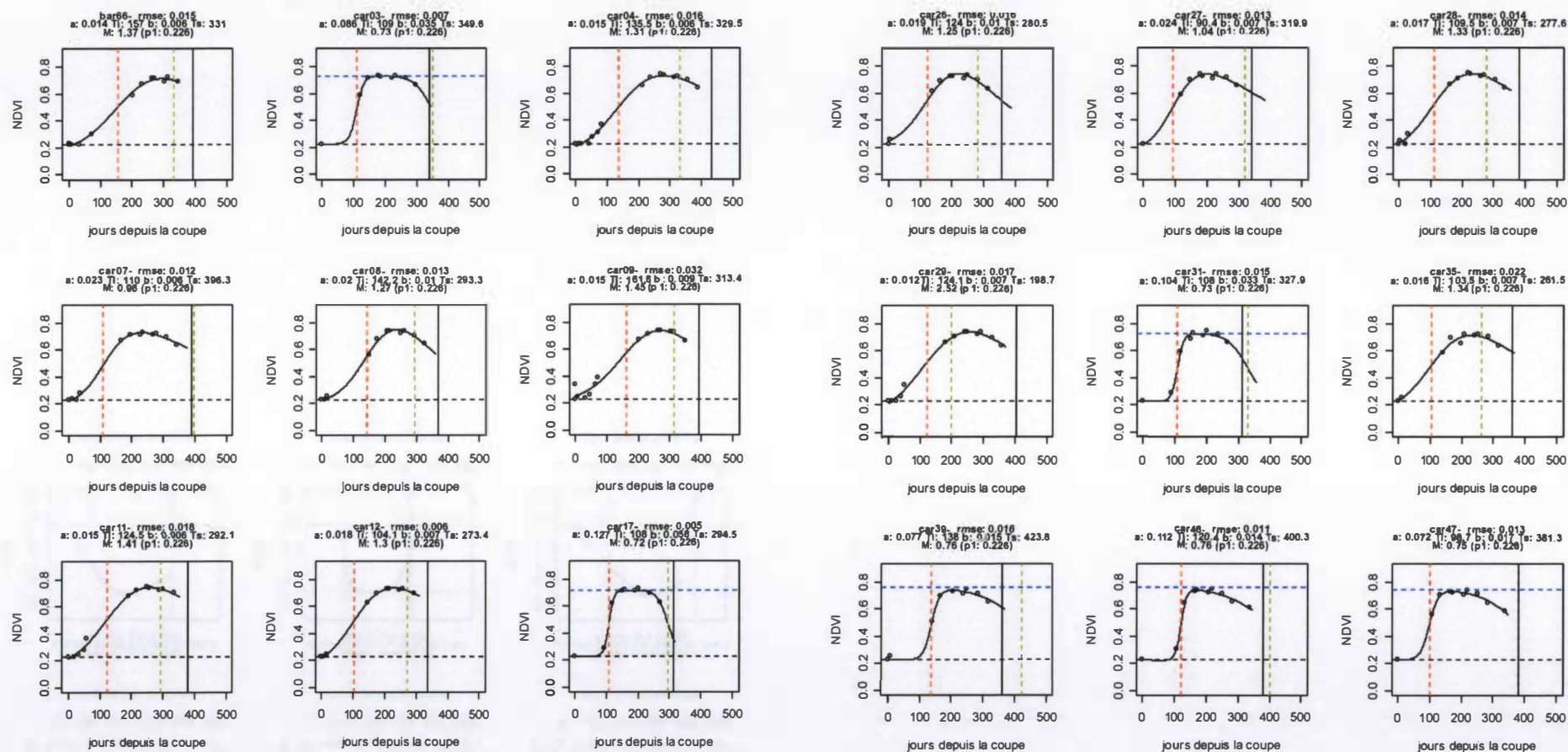


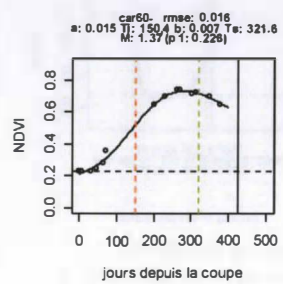
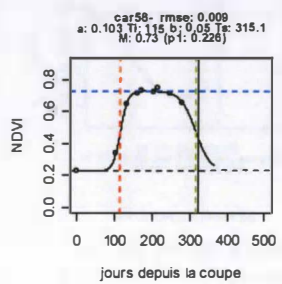
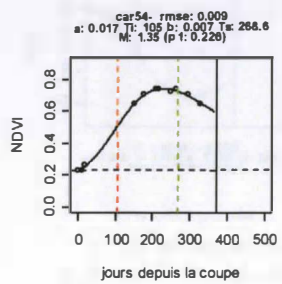
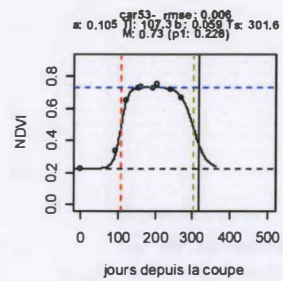
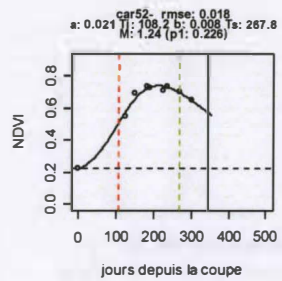
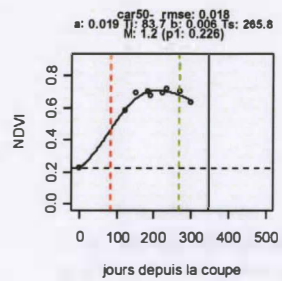




















## POTENTIALITES DE LA TELEDETECTION SATELLITAIRE POUR LA FILIERE CANNE A SUCRE (PROJET SUCRETTE)

RIBBES Florence

Spot Image  
5 Rue des Satellites, Bp 4359, 31030 Toulouse  
Cedex 4, France  
+33-561 62 19 42 48 – Fax : +33-561 62 19 43 43  
[florence.ribbes@spotimage.fr](mailto:florence.ribbes@spotimage.fr)

BEGUE Agnès

CIRAD-AMIS  
Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34  
093 Montpellier Cedex 5, France  
+33-467 54 87 39 – Fax : +33-467 54 87 00  
[agnes.begue@cirad.fr](mailto:agnes.begue@cirad.fr)

SIEGMUND Bertrand

CIRAD-CA  
Station de la Bretagne, BP 20, 97 408 Saint Denis  
Messagerie Cedex 9, Réunion  
Tel : +262 52 80 20 - Fax : +262 52 80 21  
[siegmund@cirad.fr](mailto:siegmund@cirad.fr)

TODOROFF Pierre

CIRAD-CA  
Station de Roujol, 97 170 Petit-Bourg, Guadeloupe  
Tel : +590 94 89 00 - Fax : +590 94 88 99  
[Pierre.todoroff@cirad.fr](mailto:Pierre.todoroff@cirad.fr)

AUTREY L.J.C.

MSIRI  
Réduit, Maurice  
Tel : +230 454 1061- Fax : +230 454 1971  
[Jcautey@msiri.intnet.mu](mailto:Jcautey@msiri.intnet.mu)

### Résumé

Dans le projet démonstratif SUCRETTE du Réseau Terre & Espace, nous proposons d'étudier la faisabilité technique et la viabilité économique de nouveaux produits et outils spatiaux pour une agriculture raisonnée en zone tropicale. Les récents et futurs projets d'observation de la Terre (très haute résolution spatiale, temporelle, spectrale ...) devraient ouvrir de nouveaux champs d'application que nous essayons d'anticiper dans ce projet.

Dans un premier temps sont présentées différentes applications de la télédétection satellitaire dans les domaines de l'agriculture institutionnelle et privée. Le domaine d'application du spatial est désormais élargi avec le nouveau satellite SPOT5 qui fournit des données à haute résolution géométrique noir & blanc (2,5 m) et couleur (10 m) sur de grandes surfaces (3600 km<sup>2</sup>). L'augmentation de la résolution permet dorénavant une cartographie au 1:10 000, tout en préservant la richesse thématique des images pour la reconnaissance du contenu des parcelles et une description de l'hétérogénéité des surfaces observées.

Dans un deuxième temps est présenté le projet SUCRETTE qui propose, à partir de sites test à la Réunion, Maurice et en Guadeloupe, de développer un prototype d'aide à la gestion de la filière canne. Le cœur de ce système est un SIG parcellaire, couplé à un modèle de production et à une base de données agro-météorologiques, alimenté en temps quasi-réel par des séries temporelles d'images satellitaires. Ce système devrait faciliter 1. la mise à jour du parcellaire cannier et l'évaluation des nouvelles réglementations, 2. le suivi de la campagne de récolte et 3. les prévisions de rendement par une meilleure prise en compte de la variabilité spatio-temporelle du développement de la canne.

## Abstract

In the SUCRETTE project (Earth & Space network), we propose to study the technical feasibility and the economic viability of new spatial products and tools for precision agriculture in tropical areas. The recent and future projects in Earth observation (high spatial, temporal and spectral resolutions...) should lead to new fields of application, which we try to anticipate in this project.

First, various applications of satellite remote sensing in the fields of institutional and private agriculture are reviewed. These applications are now widened with the new SPOT5 satellite, which provides black & white (2,5 m) and color (10 m) high spatial resolution data over large areas (3600 km<sup>2</sup>). The increase in the resolution allows a 1:10 000 cartography, while preserving the vegetation discrimination and the description of the crop heterogeneity.

Secondly, the demonstration project SUCRETTE is presented. The objective of the project is to develop, from test sites in the Reunion Island, the French West Indies and Mauritius, the prototype of a decision support system for sugarcane agriculture and industry. The heart of this system is an on-shelf GIS, coupled to a crop production model and an agro-meteorological data base, supplied with time series of satellite images. This system should facilitate 1. the update of the crop inventory and the evaluation of the new regulations, 2. the follow-up of the harvest campaign and 3. the yield estimates through a better account of the spatiotemporal variability of the crop development.

## Mots Clés

Satellite SPOT, Parcellaire, Récolte, Production, Agriculture de Précision

## 1. Introduction

Dans la majorité des pays, le secteur agricole constitue aujourd'hui un domaine d'intérêt particulièrement sensible, tant d'un point de vue social, qu'économique ou environnemental. Dans ce contexte, la cartographie et le suivi des espaces cultivés ont des applications dans divers domaines : inventaire des surfaces agricoles annuelles (grandes cultures) et pérennes (vergers, vignes,...), prévision de récolte (gestion des stocks, sécurité alimentaire), contrôle et suivi des mesures d'aides agricoles dans un cadre réglementé ou gestion spatialisée des pratiques agricoles (agriculture de précision).

L'« agriculture de précision » est définie ici comme une stratégie de gestion qui utilise les technologies de l'information pour combiner des données de différentes sources dans une prise de décision sur la conduite de la culture (National Research Council, 1997). Ce type d'agriculture est aujourd'hui en plein développement sur certains continents (Amérique du Nord, Europe et Australie) et des organismes publics et privés travaillent sur des cahiers des charges de constellations de satellites dédiés à cette application (Guérif et al., 2001). L'agriculture de précision dans les pays du Sud reste quant à elle à inventer :

- Dans le cadre de l'agriculture dite « familiale », en présence de petit parcellaire et de faibles quantités d'intrants, l'agriculture de précision peut prendre son sens dans la caractérisation de la variabilité inter-parcellaire et s'adresse avant tout aux groupements de producteurs, aux instituts techniques et aux industriels de la filière agricole (la plupart des petits agriculteurs eux-mêmes pratiquant depuis toujours l'agriculture de précision ...).



- Dans le cadre de l'agriculture industrielle, où les champs sont grands et où les propriétaires ont des capacités d'investissement généralement plus importantes, le premier besoin est une meilleure gestion spatiale et temporelle des intrants pour minimiser les coûts et les impacts sur l'environnement (Jhoty and Autrey, 2001; Srinivasan, 1998). Ces besoins sont identiques à ceux des pays du Nord, mais la mise en œuvre des solutions techniques peut fortement différer. En présence d'une faible mécanisation, l'agriculture de précision peut se concevoir comme la définition de zones homogènes d'intervention (pour l'échantillonnage ou pour les interventions culturales).

Ainsi, si le premier enjeu de l'agriculture de précision est la modulation spatiale et temporelle des techniques culturales, celle-ci ouvre également des perspectives très intéressantes de suivi et de qualification à différentes échelles (certification des pratiques agricoles et des exploitations, mise en place d'observatoires des agrosystèmes permettant l'évaluation de l'impact de changements de pratiques agricoles ou d'aménagements ruraux sur le milieu) qui sont liées à l'acquisition d'un volume considérable de données spatialement structurées sur les parcelles et les exploitations agricoles.

## 2. Télédétection et agriculture de précision

### Des solutions opérationnelles

Parmi les moyens technologiques de mesure et d'information mis en œuvre à différentes échelles spatio-temporelles pour des applications agricoles, les satellites offrent des solutions opérationnelles. A titre d'exemple, cinq observations sur une campagne agricole donnent une bonne idée de l'historique de la plante : sa croissance, son état de santé, le moment de la récolte. Les réponses faites à partir de l'interprétation des images satellitaires peuvent aider les agriculteurs à mieux gérer leurs parcelles. En Afrique du Sud, le SAC (Satellite Application Center), la station de réception locale propose depuis 1999 un service d'abonnement à ce type de données. Et c'est un franc succès, notamment auprès des gros exploitants de canne à sucre de la côte est.

Dans l'exemple donné en Figure 1, une image multispectrale Xi (4 bandes) du satellite SPOT 5 a été utilisée pour analyser les variations de la biomasse de la canne à sucre (photosynthèse de la végétation). L'image de gauche est une composition colorée montrant la végétation active sous plusieurs tons de rouge. L'irrigation en pivot fait nettement apparaître des

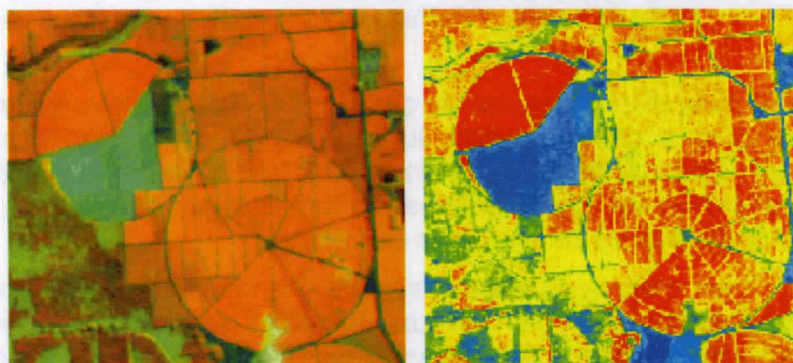


Figure 1 : Parcelles de canne à sucre à Maurice :  
à gauche, composition colorée SPOT 5 (10m de résolution)  
et à droite, l'indice de végétation normalisé dérivé.

surfaces circulaires dont la plus grande mesure 120 ha. L'image de droite est un indice de végétation créé à partir de la première image et classifiée pour mettre en évidence les variations de l'activité photosynthétique de la canne.

Les zones bien irriguées (rouge dense et homogène) et celles irrégulièrement arrosées (variations circulaires) sont ainsi bien identifiées. Les agriculteurs peuvent exploiter de telles informations, premièrement, pour entreprendre des actions correctives et calculer des taux d'application variables. Mais d'autre part, les images satellites peuvent aussi être utilisées de la même façon pour surveiller les cultures elles-mêmes, et en particulier, évaluer l'impact des actions correctives. Cet exemple illustre comment l'imagerie satellitaire est une aide pour la gestion des cultures en permettant de rationaliser les intrants et ainsi d'améliorer les marges.

## Le satellite SPOT 5

Désormais, l'apport des données satellite pour l'agriculture de précision devrait être encore plus évident avec l'arrivée du nouveau satellite SPOT 5 qui fournit des données à haute résolution géométrique noir & blanc (2,5 m) et couleur (10 m), et couvrent des surfaces de 60 x 60 km.

Les images 2,5 et 5 m noir & blanc offrent une meilleure détection des limites et une meilleure mesure de surface, notamment pour les petites parcelles. Il est possible de délimiter des parcelles inférieures à 0,10 ha et les éléments non agricoles (chemins, haies, arbres, habitations, infrastructures d'irrigation...) sont facilement identifiables et numérisables (Figure 2).

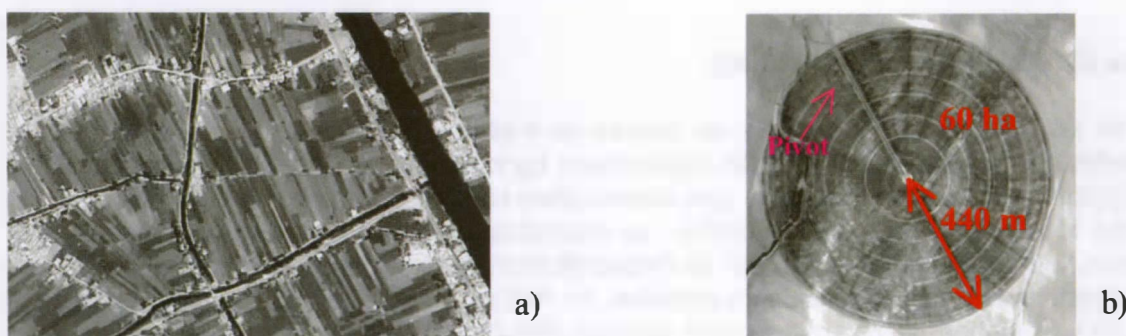


Figure 2 : Potentialités des images N&B à 2.5m de résolution de SPOT 5 pour l'irrigation :

- a) Le Caire, Egypte, 29/05/02 - Détermination des canaux d'irrigation jusqu'au niveau tertiaire,
- b) Tunis, Tunisie, 19/07/02 - Culture en pivot, visualisation des passages de roue.

Pour l'identification cadastrale des parcelles, par exemple, les images SPOT 5 vont permettre de générer des documents au 1:10 000 et ce, sur de grandes surfaces. A leur qualité géométrique irréprochable s'ajoute donc une meilleure fiabilité de l'information, puisque sont supprimées les étapes délicates de mosaïquage et d'égalisation radiométrique, nécessaires avec des images de plus petite couverture.

Avec les images en couleurs, s'ajoute une meilleure richesse thématique pour la description de l'hétérogénéité des surfaces observées et pour la reconnaissance du contenu de la parcelle. La richesse thématique associée à la très haute résolution de SPOT 5 va faciliter le traitement des données et rendre le diagnostic plus fiable et plus rapide.

De plus, SPOT 5 est doté de l'instrument HRS (Haute Résolution Stéréoscopique) qui permet de collecter simultanément des images stéréoscopiques destinées à la production de MNT (Modèle Numérique de Terrain) et à l'orthorectification d'images HRG (Haute Résolution Géométrique) (Figure 3). La capacité exceptionnelle d'acquisition stéréoscopique de SPOT 5 (120 km x 600 km), combinée à une filière industrielle, permet la constitution d'une base de données MNT mondiale, qui couvrira plus de 30 millions de km<sup>2</sup> en 5 ans, avec une précision altimétrique meilleure que 10 m et une précision absolue de localisation meilleure que 15 m.



Les systèmes d'information géographique (SIG) utilisent des images, aériennes ou satellitaires, qui doivent être superposées avec précision aux autres données (statistiques, documentaires, administratives, socio-économiques, géographiques). Les MNT issus de l'instrument HRS permettent la correction des effets du relief, indispensable à une superposition correcte. Les orthoimages de SPOT 5, combinées à ces MNT, donnent une vision précise du relief (Figure 3).

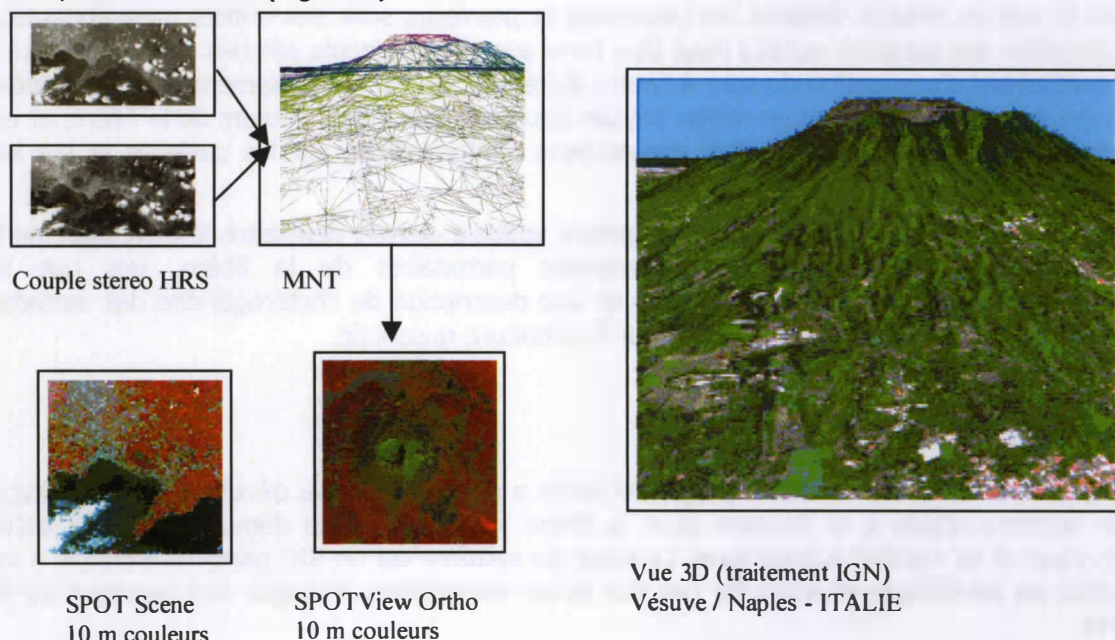


Figure 3 : Production d'un MNT et d'une vue 3D sur le Vésuve, Italie, à partir des données SPOT5.

Devant les potentialités spatio-temporelles des nouveaux capteurs satellitaires pour le développement des applications agricoles, le CIRAD et Spot Image ont décidé de lancer le projet Sucrétte afin de développer un prototype d'aide à la gestion de la filière canne à sucre piloté par des données de télédétection.

### 3. Le projet SUCRETTE (SUIVI de la Canne à sucRE par TélédéTecton satEllitaire)

A l'heure de la globalisation du commerce mondial, la recherche sucrière doit apporter à l'industrie des solutions pour augmenter sa compétitivité à travers une productivité accrue et une réduction des coûts de production. L'ébauche de ces solutions passe par un diagnostic spatialisé de la production des bassins sucriers et de l'approvisionnement des usines. Les besoins en information et outils des acteurs de la filière s'expriment différemment selon le type de filière.

#### Les besoins en informations spatialisées :

Dans le cas du complexe agro-industriel où l'étendue et la localisation des surfaces cultivées ainsi que le déroulement de la campagne de récolte sont généralement bien connus et intégrés dans un système d'information, les besoins en information sont essentiellement d'ordre agronomique à l'échelle intra- et inter-parcellaire. Un outil spatial opérationnel de suivi en temps quasi-réel du développement de la culture et de la détection des anomalies (retard ou arrêt de la croissance) pourrait facilement être intégré dans le système de gestion



des plantations (SIG parcellaire avec base de données météorologiques et agronomiques ...). Cet outil de détection pourrait être complété par un outil de diagnostic du stress (stress ponctuel d'origine phytosanitaire ou hydrique, ou stress permanent lié à la topographie, au type de sol ou au précédent cultural) et ainsi aider à l'optimisation du pilotage de la plantation.

Dans le cas du modèle dissocié où industriels et planteurs sont des entités indépendantes, l'implication des pouvoirs publics peut être forte avec des objectifs affichés de production et de contraintes d'occupation du sol ; à l'autre extrémité, on trouve également dans ce modèle des systèmes de production en milieu paysan peu contrôlés où les acteurs de la filière, et en particulier les industriels, sont très demandeurs d'informations sur les surfaces et sur les productions.

Au-delà de l'aspect parcellaire, la télédétection spatiale devrait permettre le développement de nouveaux produits pour les organismes partenaires de la filière, tels que la reconnaissance du contenu des parcelles et une description de l'hétérogénéité des surfaces observées qui sont d'un grand intérêt pour l'agriculture raisonnée.

### Les objectifs du projet :

Compte-tenu de la demande, le projet SUCRETTE a pour objectif de développer le prototype d'un système d'aide à la décision pour la filière « canne » et de démontrer sa faisabilité technique et sa viabilité économique. Le cœur du système est un SIG parcellaire couplé à un modèle de production et alimenté par des séries temporelles d'images d'observation de la Terre.

Ce prototype s'adresse aussi bien aux industriels, aux collectivités locales et organisations professionnelles qu'aux gros planteurs. Développé en intelligence avec les systèmes institutionnels existants, notamment les SIG parcellaires mis en place par les DAF et les planteurs, il devrait faciliter :

1. La mise à jour du parcellaire et l'évaluation des nouvelles réglementations ;
2. L'organisation et suivi de la campagne de récolte (cartographie dynamique des coupes) ;
3. Le suivi du développement de la culture tout au long de son cycle (cartographie des anomalies de croissance à l'échelle d'un territoire -comme à la Réunion- ou à l'échelle d'une parcelle dans les complexes agro-industriels) et les prévisions de rendements.

Le prototype sera mis en place sur 3 sites test : un bassin de collecte à la Réunion, une grande plantation à Maurice et en Guadeloupe.

L'innovation de ce projet se trouve à la fois :

- dans son intégration au niveau de la filière (partage des données spatiales et de l'outil par l'agriculture privée et institutionnelle) ;
- dans la nature des informations produites à partir des images spatiales : cartes de variables agronomiques (carte des coupes et carte des rendements attendus) en sus des cartes d'indices spectraux ;
- dans son application à des systèmes de production différents (petits et gros planteurs, filière intégrée et dissociée) mais forcés par les mêmes contraintes et faisant appel aux mêmes types de données et modèles.

## Les images satellitaires :

Les satellites SPOT seront programmés sur des périodes distinctes pendant le cycle cultural de la canne. Sur les sites étudiés sont prévues 1 image par mois pendant l'inter-campagne et deux images par mois pendant la récolte (2003). Pour compléter le jeu de données, un lot de 3 images d'archive sera fourni sur chacun des sites d'étude.

Le jeu de données acquis sur l'Ile de la Réunion provient de la base de données spatiales ISLE-Réunion<sup>1</sup> (Information Satellitaire pour l'Environnement de la Réunion) réalisée sur l'initiative du CNES. Cette base de données a pour vocation de fournir aux scientifiques des données satellite prétraitées (corrections géométriques, radiométriques, atmosphériques), multi-temporelles (1 image par mois environ, de mi-2002 à mi-2004) et multi-capteurs (SPOT, ERS) pour les interfacer avec leur modèle et développer de nouvelles applications (agriculture, risques naturels, aménagement du territoire, vulcanologie ...).

## Les produits spatiaux dérivés :

- La mise à jour du parcellaire :

Actuellement la mise à jour du parcellaire cannier se fait à partir d'ortho-photographies aériennes ou de relevés de terrain (e.g. Lainé et al., 1997). Comme nous l'avons vu précédemment, les nouveaux capteurs d'observation de la Terre à très haute résolution spatiale (métrique voire sub-métrique) concurrencent aujourd'hui les photographies aériennes avec un avantage certain lié à la taille de l'image et au gain de temps dû aux pré-traitements. Le projet SUCRETTE devra établir les capacités des différents capteurs satellitaires pour la cartographie et la mise-à-jour du parcellaire (Figure 4) et notamment l'apport de ces nouveaux produits pour l'aide aux producteurs dans l'établissement de leur déclaration.

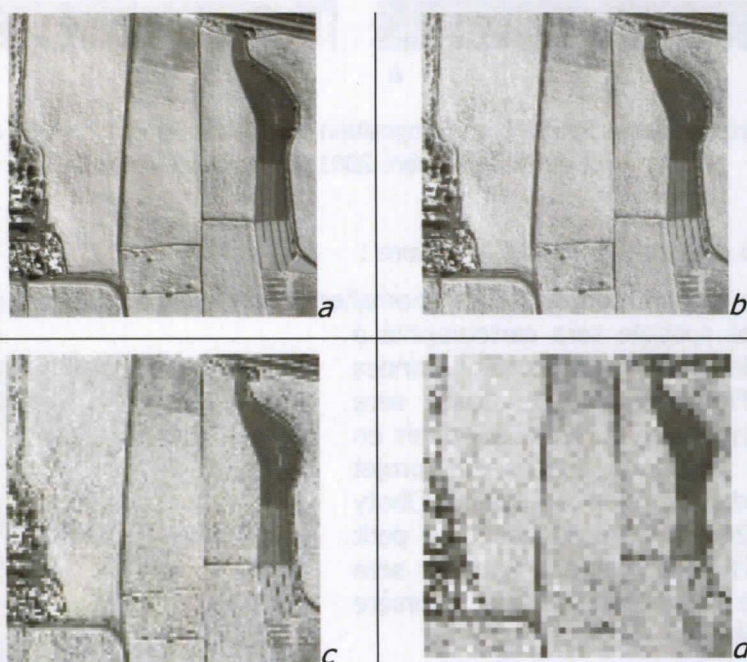


Figure 4 : Parcellaire cannier de la Réunion mesuré avec une résolution de 1m par Ikonos (a), et simulé pour le satellite SPOT 5 à 2.5m (b), 5m (c) et pour les autres satellites SPOT à 10m (d). La taille de l'imagette est de 500m par 500m.

<sup>1</sup><http://medias.obs-mip.fr/reunion/>



- Le suivi de la campagne de récolte :

Actuellement, la production d'un bassin cannier d'approvisionnement d'usine est estimée à partir d'un système essentiellement déclaratif. Cartographier les surfaces cultivées, suivre l'évolution de la campagne de récolte (cartographie des parcelles récoltées au 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> tiers de la campagne et statistiques associées) et standardiser les estimations de rendement sont autant d'améliorations souhaitées par les usiniers. Les opérateurs sous-traitants (les SICA, les CUMA, les entreprises privées de travaux agricoles ...) sont également intéressés par des informations actualisées et objectives sur le déroulement de la campagne.

Pour cartographier les coupes, la méthode envisagée repose sur le développement d'un algorithme de traitement des séries temporelles (détection des nuages et des ombres, détection des changements, ...). Grâce à des techniques de type « classification par parcelle », l'algorithme permettra de cartographier de façon automatique les surfaces récoltées depuis l'image précédente (Figure 5), soit 1 à 2 fois par mois.

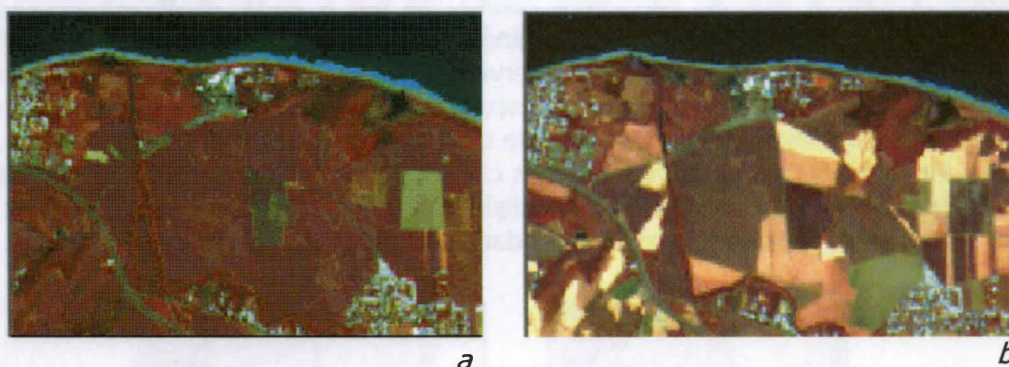


Figure 5 : Extrait d'images Spot4-Xi en composition colorée du 26 juin 2001 en début de récolte (a) et du 20 septembre 2001 (b) en pleine récolte.

- Le suivi du développement de la culture :

Suivie tout au long de son cycle, les anomalies de croissance de la canne seront traquées. L'hétérogénéité spatiale sera cartographiée à l'échelle de la parcelle dans les grandes plantations (Figure 6) ; cette étude sera menée à Maurice avec le MSIRI qui a mis en place depuis plusieurs années un projet d'agriculture de précision à Médine (Jhoty and Autrey, 2001). Dans le cas d'un petit parcellaire, l'hétérogénéité spatiale sera caractérisée à l'échelle de la sole cannière comme à la Réunion.

De plus, le suivi temporel (saisonnier et annuel) de la variabilité intra-parcellaire devrait donner des clés d'interprétation sur l'origine de cette variabilité (variabilité intrinsèque au terrain ou variabilité induite par un stress ponctuel).

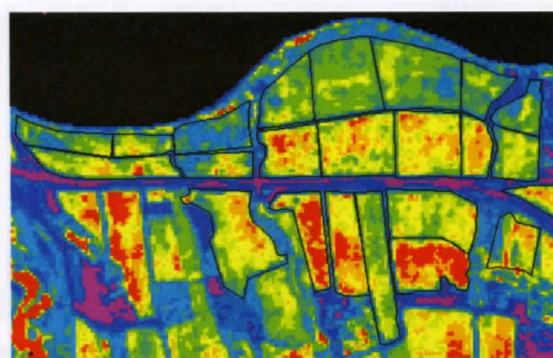


Figure 6 : Mise en évidence de la variabilité intra-parcellaire de la canne à la Réunion. Image colorisée d'indice de végétation normalisé calculé à partir d'image SPOT 5 à 10m de résolution.

- Les prévisions de rendements :

Le passage des cartes descriptives (parcellaire, suivi des coupes, variabilité intra-parcellaire...) aux informations utiles pour les décideurs (statistiques agricoles, carte de rendement, ou carte de stress ...) se fera par l'intermédiaire de modèles ou de règles de décision (expertise) intégrés dans un SIG dédié. Par exemple, les cartes d'âge dérivées des séries temporelles d'images satellite pourront être utilisées pour initialiser un modèle de production (date de la plantation ou de la repousse) et ainsi affiner les prévisions de rendement par un meilleur calage entre le cycle de la canne et les conditions météorologiques (Figure 7). Le modèle de production qui sera utilisé dans ce projet est le modèle MOSICAS (Martiné et al., 1999) développé par le CIRAD-CA, qui associe la croissance de la culture et le bilan hydrique du système eau-sol-plante. MOSICAS a été calé et validé sur des sites de différents climats contrastés de la Réunion, et est actuellement en cours de validation en Guadeloupe.

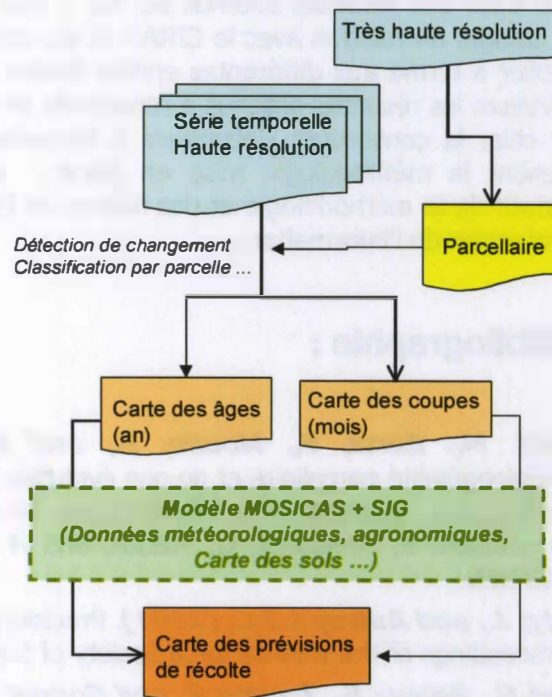


Figure 7 : Exemple de spatialisation des prévisions de récolte.

## Le SIG (Système d'Informations Géographiques) dédié

Le système d'aide à la décision sera un SIG dédié (nombre de fonctions limitées) et autonome (ne nécessite pas la licence d'un logiciel commercial) (Lo Seen et al., 2000).

Les spécifications de ce système se feront avec les partenaires de la filière et un prototype sera développé dans le cadre du projet. Ce prototype devrait permettre d'intégrer les données agronomiques, météorologiques et les produits dérivés des images satellitaires, de créer ou modifier le parcellaire agricole et sa base de données associée, de spatialiser les résultats du modèle de production et de générer les produits cartographiques et les éléments de diagnostic utiles à la gestion de la sole cannière.

Le prototype sera mis en place sur les sites d'étude après récupération des données agronomiques, météorologiques et parcellaires existantes sur les sites d'étude. Le prototype et les résultats seront évalués avec les utilisateurs sur la base du gain ou de l'impact du système sur l'organisation de la filière « canne » et sur le rendement à la parcelle.



## Etude pour la mise en place d'un système opérationnel :

Sur la base des résultats obtenus sur les 3 sites pilotes (Réunion, Maurice et Guadeloupe), Spot Image, en relation avec le CIRAD et ses autres partenaires, mettra tout en œuvre pour proposer à terme aux différentes entités finales (usiniers, administratifs et propriétaires) de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble de leurs superficies cultivées en canne à sucre. Pour cela, le consortium s'attachera à formaliser en fin de projet un cahier des charges reprenant la méthodologie mise en place : acquisition et pré-traitement des données, descriptif de la méthodologie et des filières de traitement, intégration dans un SIG, diffusion et protection de l'information...

## 4. Bibliographie :

- Guérif, M., Baret, F., Moulin, S., and Bégué, A. (2001).** Prise en compte de l'hétérogénéité parcellaire et de son évolution temporelle dans la gestion des interventions techniques : potentiel de la télédétection. In: Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, E. Malézieux, G. Trébuil, and M. Jaeger, Eds., CIRAD/INRA ed. Montpellier, 303-326.
- Jhoty, I., and Autrey L.J.C. (2001).** Precision agriculture for sugar cane in Mauritius. In : Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technology, Brisbane, 24: 47-50.
- Lainé G., Baleux F., Truong P. and Gounel C. (1997).** Integration of SPOT data with a photogrammetric data base for sugarcane cropland updating at 1:25000 scale in Guadeloupe (French West Indies), 18<sup>th</sup> ICA/ACI International Cartographic Conference ICC, Stockholm (Sweden).
- Lo Seen D., Arreola M., Clopes A., Scopel E. and Bégué A. (2000).** Couplage d'un modèle agronomique et système d'information géographique : développement d'un applicatif pour la représentation spatialisée de l'effet du semis direct sur paillis de résidus pour la culture du maïs pluvial dans l'état de Jalisco (Mexique), in: Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, E. Malézieux, G. Trébuil, and M. Jaeger, Eds., CIRAD/INRA ed., 283-301.
- Martiné J.F., Siband P. and Bonhomme R. (1999).** Simulation of the maximum yield of sugar cane at different altitudes : effect of the temperature on the conversion of radiation into biomass. *Agronomie*, 19: 3-12.
- National Research Council (1997).** "Precision agriculture in the 21<sup>st</sup> Century," National Academy Press, Washington D.C. (US).
- Srinivasan A. (1998).** Precision farming in Asia : progress and prospects. In : 4<sup>th</sup> "International Conference on Precision Agriculture", St Paul (USA), 19-22 July.



# **APPLICATION OF REMOTE SENSING TECHNOLOGY TO MONITOR SUGAR CANE CUTTING AND PLANTING IN GUADELOUPE (FRENCH WEST INDIES).**

*Agnès BEGUE,  
CIRAD-AMIS,  
Maison de la Télédétection, 500 rue JF Breton, 34 093 Montpellier, France  
Phone : +33 4 67 54 87 39  
Fax : +33 4 67 54 87 00  
Email : agnes.begue@cirad.fr*

*Pascal DEGENNE, CIRAD-AMIS, Montpellier, France  
Anne PELLEGRINO, CIRAD-AMIS, Montpellier, France*

*Pierre TODOROFF,  
CIRAD-CA,  
Station de Roujol, 97 170 Petit Bourg, Guadeloupe, France  
Phone : +590 5 90 41 10 95  
Fax : +590 5 90 94 88 99  
Email : pierre.todoroff@cirad.fr*

*Florence BAILLARIN,  
Spot Image,  
5 rue des satellites, 31030 Toulouse, France  
Phone : +33 5 62 19 42 48  
Fax : +33 5 62 19 43 43  
Email : florence.baillarin@spotimage.fr*

## **Abstract**

In the context of the SUCRETTE project, the CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), in collaboration with Spot Image Company, conducts research activities to study the potentialities of remote sensing for sugarcane monitoring. Among different operational products that can be derived from satellite images, we present here how a time series of SPOT4 & 5 satellite data could be used as a decision support tool for planting survey and harvest monitoring of small-scale cane fields.

A pilot study was set up in Guadeloupe (French West Indies) where the individual sugarcane fields are progressively mapped in the framework of the AGRIGUA project. The objectives were to provide the fraction of harvested fields throughout the milling season and a summary map of ploughed fields at the end of the planting season. The spectral properties of the different cane field status - full covered green canopy, stressed canopy, crop residues and bare soil - showed that harvested and ploughed fields could be easily mapped with high accuracy (more than 90%) thanks to a field-base approach.

The resulting maps were then integrated within a decision support system devoted to sugarcane management. This on-shelf GIS permits to visualize maps and edit monthly statistics of the management practices in each administrative area.

## 1. Introduction

The SUCRETTE<sup>1</sup> research project (Ribbes, Bégue et al., 2002), investigated by CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) and Spot Image Company, explores the potentialities of remote sensing to characterize sugarcane management practices (cutting, planting, fertilization, irrigation) and crop conditions (chlorophyll and moisture status of the crop), and to estimate sugarcane yield. The final product will be an operational management support tool for the sugarcane industry. The center of such a system is a field-based map coupled with a sugarcane production model and integrating thematic maps derived from high resolution satellite time series.

### *Previous remote sensing studies on sugar cane*

In the literature, the principal use of remote sensing for sugarcane monitoring is visual interpretation or image classification for sugarcane area mapping (e.g. McDonald and Routley, 1999; Narciso and Schmidt, 1999; Hadsarang and Sukmuang, 2000). The results are generally very acceptable (accuracy of 90% or more) when high resolution satellite data (Landsat, SPOT) are acquired prior the harvest season, when the crop canopy is fully developed. Literature references on the use of remote sensing for management practices or crop conditions mapping showed that remote sensing could be used to characterize cane phenology, variety or water-stress (Gers, 2003; Schmidt et al., 2000).

However, there are very few publications (Gers and Schmidt, 2001) on the use of remote sensing for cutting or planting surveys, mainly because satellite solutions are still insufficient to provide a large number of image acquisitions during several consecutive months. At this time, and for cloudy tropical conditions, only satellites with a spatial resolution in accordance to field-scale and presenting programming capabilities, like Spot satellites, offer an acquisition frequency high enough to monitor these dynamic processes.

### *Objective*

The objective of this paper is to present the potentialities of satellite remote sensing for sugarcane planting survey and harvest monitoring in small-scale fields areas under tropical cloud conditions.

Sugarcane planting is approached through mapping ploughed fields at the end of the planting season. We made the assessment that all the ploughed fields were going to be planted with sugarcane, which is not true and should be quantified. However, maps of ploughed fields should be highly correlated to sugarcane planting; the potential applications of such maps are a better knowledge of the sugarcane management practices and a contribution to the estimation of next year yield.

The harvest monitoring product is different as it is a statistical and dynamic product. Throughout the milling season, once a month, the fraction of harvested fields is calculated on sampled areas. This information could be used to improve efficiency in both factory and field, in particular by :

- a better estimation of the yield (the area harvested between two satellite scenes can be correlated with total tonnes cane delivered over the period to provide an estimate of the productivity) ;
- a better assessment of the standing cane area still to be harvested to optimize the cutters deployment and transport operations.

---

<sup>1</sup> SUIvi de la Canne à sucRE par TélédéTEction

## 2. The study site

The study area takes place in Guadeloupe, island of the French West Indies. The sugarcane covers about 12 000 ha, representing about 30% of the total agricultural land (**Figure 1**). The mean size of the sugar cane fields is about 1 ha.

To test the methodology, we chose two test sites at different scales (**Figure 1**): a regional scale (Grande-Terre, 6880 ha of sugarcane encompassed by the coordinates 16°10'N to 16°30'N and 61°15'W to 61°35'W) with a majority of small-scale grower cane fields, and a farm scale (Gardel Farm, 16°17'N and 61°19'W) made of about 160 fields over 900 ha.

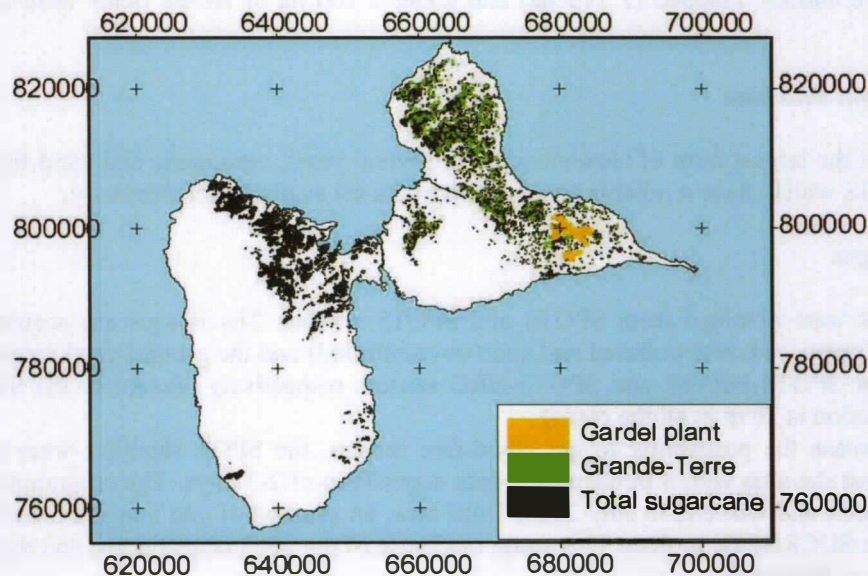


Figure 1 : Map of the 1999 sugarcane fields in Continental Guadeloupe (Lainé, 1999) ; Up-dates (AGRIGUA 2003) are in green+orange for the regional scale (Grande-Terre) and in orange for the farm scale (Gardel). Map projection is UTM Hayford.

In Guadeloupe, the milling season lasts about 4 months (between February and June), and growers plant during the rainy season, from July to October (**Figure 2**). In 2003 the mill opening and closing dates were March 12<sup>th</sup> and June 30<sup>th</sup> respectively.

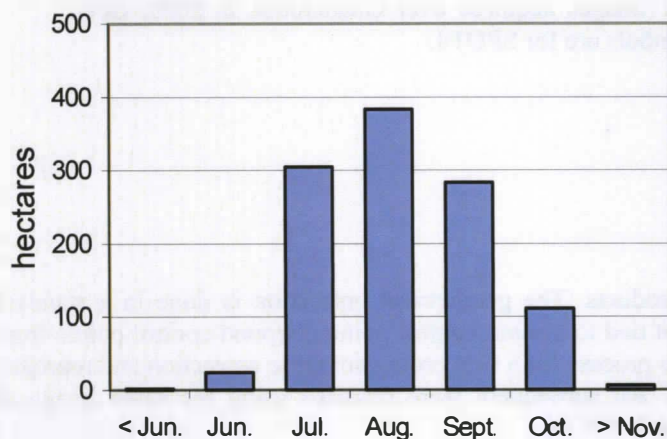


Figure 2: Time distribution of the planting areas in Grande-Terre area (AGRIGUA 2003).



### 3. The satellite images and the geographic data base

#### *The AGRIGUA survey*

The Guadeloupe cane field maps were obtained from the CIRAD-AGRIGUA<sup>2</sup> project. The AGRIGUA project consists in developing a Geographic Information System referencing all the agricultural fields of Guadeloupe. The sugarcane fields were first delineated in 1999 using digital orthophotographs (Lainé, 2001), and the field boundaries are progressively up-dated since 2002 by means of Differential Global Positioning Systems (DGPS) surveys. At the end of year 2003, planted cane fields were entirely mapped (1 113 ha) and about 1 100 ha of ratoon fields were up-dated in Grande-Terre.

#### *The Gardel Farm data base*

Gardel is one of the largest farm of Guadeloupe. For several years, agronomic and yield field data are recorded in a GIS which made a reliable and extensive data set available for this study.

#### *The SPOT images*

Satellite images were obtained from SPOT4 and SPOT5 sensors. The images are acquired in four spectral bands (green, red, near-infrared and shortwave-infrared) and the ground pixel resolution is 20 m and 10 m for SPOT4-HRVIR and SPOT5-HRG sensors respectively (except in the SWIR band, where the resolution is 20 m in all the cases).

In order to increase the probability to get cloud-free images, the SPOT satellites were intensively programmed over the area with a frequency of data acquisition of 2-3 days. The programming begins in September 2002 and will end in July 2004. Until now, an average of one image a month has been acquired for the SUCRETTE project. This study made use of the 2003 acquisitions, and the list of the images is given in **Figure 3**.

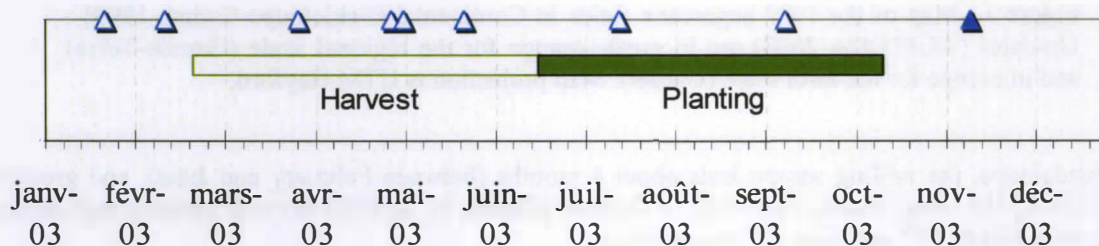


Figure 3 : Distribution of the SPOT images acquired over Guadeloupe in 2003. Open symbols are for SPOT5 and solid symbols are for SPOT4.

### 4. The methodology

#### *Image pre-processing*

The images were delivered in 2a level products. The geometrical correction is done in a standard cartographic projection (UTM WGS84) not tied to ground control points. Ground control points from the AGRIGUA field map were then used to process for a first order geometric correction and reproject in UTM Hayford (datum IGN S<sup>te</sup> Anne). All subsequent were rectified using the same image as reference. The total accuracy is about 0.5 pixels (10 m).

<sup>2</sup> Association Guadeloupéenne de Recueil d'Information Géographique d'Utilité Agricole

A mask of the clouds and their shadow was drawn on the images by visual interpretation. The digital counts were converted to reflectances through SPOT calibration coefficients and solar elevation at the acquisition time.

### *Spectral signatures of the sugarcane main stages*

For assessing what proportion of the crop has been harvested or planted, a good understanding of the spectral characteristics of the sugar cane crop over time is important for data identification and stratification. For this, four main stages of the crop were investigated : bare soil, fully developed green sugarcane crop, senescent crop and cane residues after cutting.

The spectral profiles on **Figure 4** indicate that the NIR band should permit to separate bare soil from the other classes, while the SWIR is very discriminant for cane residues. In other words, R and NIR based indices, such as the NDVI, will be helpful to monitor the vegetation growth and senescence but SWIR is necessary to correctly discriminate senescent vegetation from residues, and so to detect harvested crops.

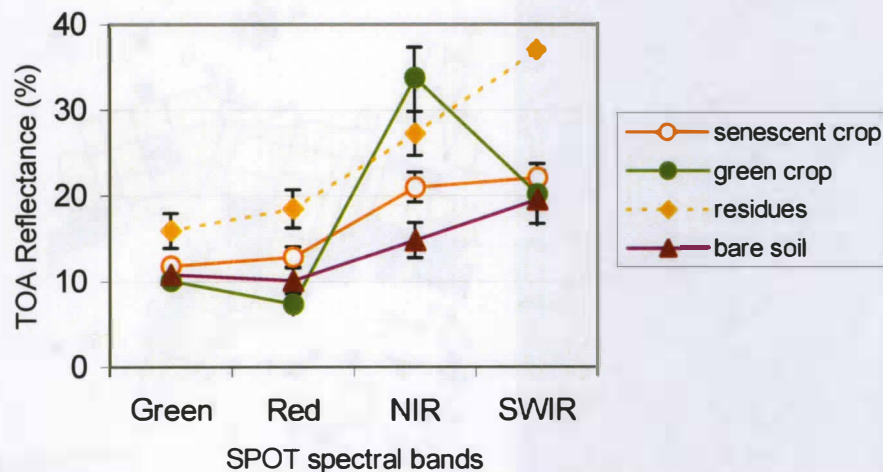


Figure 4 : Top Of the Atmosphere spectral reflectances of the main stages of a sugarcane crop. Bars represent +/- standard deviation.

### *Image classification and post-processing*

Each SPOT image was classified using a maximum likelihood algorithm within the sugarcane area. Training fields were selected by visual interpretation, and three classes were finally considered : bare soil, crop residues over bare soil and standing cane. The crop residues class was considered as harvested cane, while the bare soil class was considered as planted cane between July and November. As seen in **Figure 5**, recently harvested plots can be easily identified on a PIR-SWIR-Red color composition. The main confusions are between standing crop and cane regrowth of fields harvested early in the season, and between bare soil and harvested fields with little crop residues.

The classifications were then simplified on a per-field basis, attributing to each field the majority class. This permitted to be less sensitive to the field border effect, to increase the sampled area by classifying the whole field even if it is partially masked, and to produce neat maps.

Three methods for thematic maps production and statistics have been tested:

- The first method consisted in processing the classifications individually. Because of missing data due to clouds and shadows, each image samples a different area which is supposed to be representative of the whole region.



- The second method consisted in considering only the intersection area of non missing data of a set of classifications. For each date, an harvested or planted field map is produced taking into account the previous classifications. For example, if a field has been classified previously once as harvested, it is definitely recorded as harvested. Here, the sampled area decreases as the number of classifications used in the calculation increases.
- The third method consisted in considering the union area of non missing data and apply the same decision rule as previously: for example, if a field is classified once as planted, it is definitely classified as planted. The number of missing dates for each field should inform on the accuracy of the final field classification.

## SPOT5 image - 17 July 2003

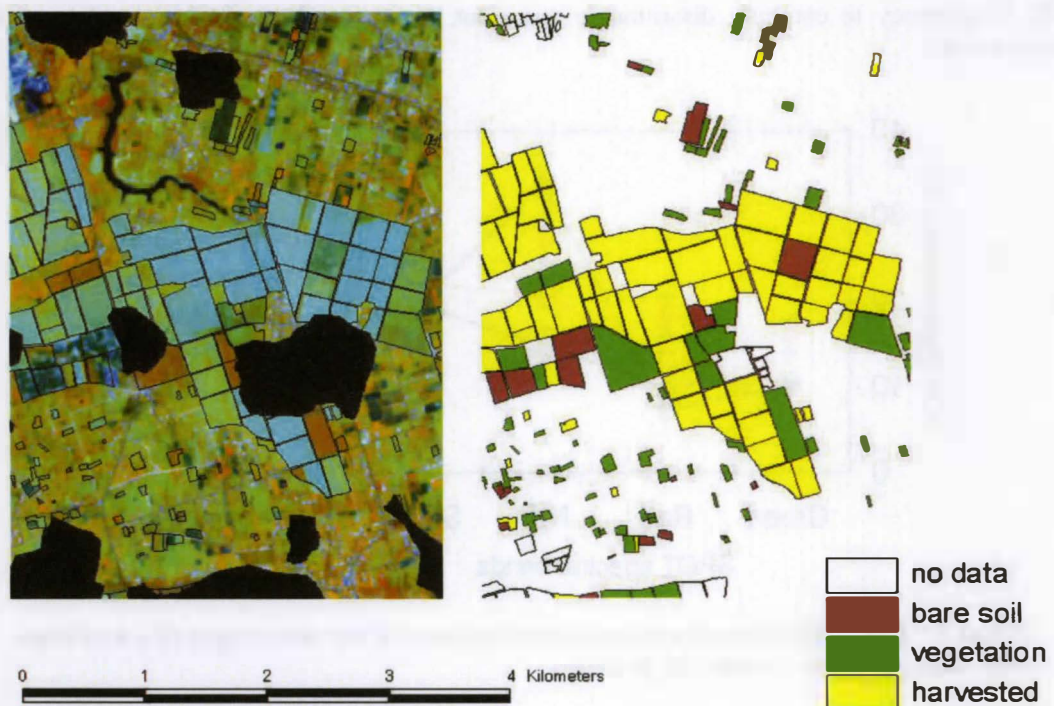


Figure 5 : On the left, a sample of a false colour composite satellite image (PIR, SWIR, Red) acquired just after the end of the milling season. Active vegetation appears in red on the image, recently harvested plot with residues appear in light blue and bare soil in dark blue. Black areas are masks of clouds. The AGRIGUA filed boundaries are on the top. On the right, the corresponding classified image post-processed on a field basis.

## 5. Results and validation

### *Harvest mapping*

The harvest monitoring was done using a set of five images (from March to July, **Figure 3**). The validation of the harvest monitoring classification procedures was performed on the area of the Gardel farm (900 ha) where all the agricultural operations are recorded in a data base (**Figure 6**).

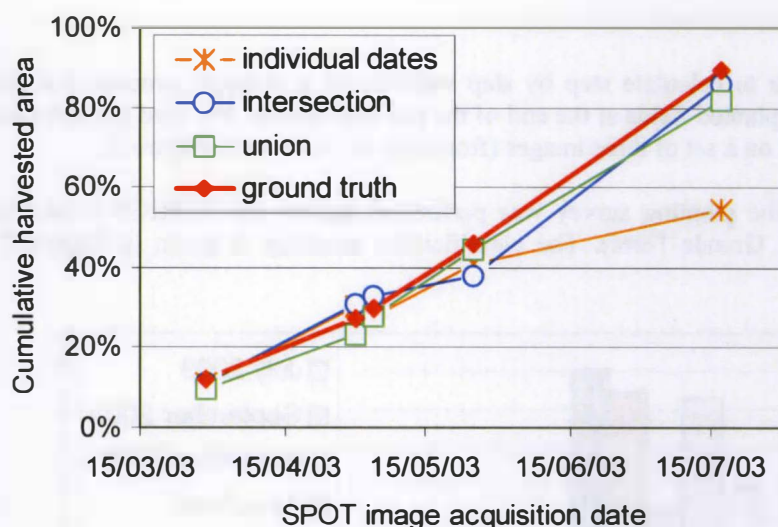


Figure 6 : Cumulative fraction of harvested area calculated on Gardel Farm using three different methods, and comparison with ground truth.

As expected, the first method in which the images were processed independantly, gives correct estimations at the beginning of the milling season, but under-estimates the harvested area at the end of the season. This under-estimation is due to the two-months cane regrowth that were classified as standing cane.

The second method, based on the intersected cloud-free area (48% of the total area in July), gives results that are very close to the ground truth with a maximum error of 8% of harvest fraction. A close examination of the classified image shows two sources of misclassification : confusion between harvest and bare soil when crop residues are taken from the field at the harvest, and confusion between vegetation and harvest when the delay between two images is too long.

The third method, based on the union of cloud-free area (98% of the total area) and attribution data decision rules in order to enlarge the sampled area, has a very good accuracy (maximum error of 8% of harvest fraction).

These results were then compared to the regional scale figures (**Table 1**). They are very similar.

In conclusion, even in unfavourable cloud conditions, one can extract with a good accuracy (more then 90%) the fraction of the cumulative harvested area on a monthly basis.

Image acquisition date	AGRIGUA 2003		GARDEL PLANT	
	Harvested area (ha)	Fraction of harvested area	Harvested area (ha)	Fraction of harvested area
29/03/03	121,2	11,2%	88,6	9,8%
30/04/03	276,3	25,5%	206,9	23,0%
04/05/03	335,1	31,0%	251,8	28,0%
25/05/03	505,3	46,7%	400,5	44,5%
17/07/03	855,2	79,0%	737,1	81,9%

Table 1: Cumulated harvested area at the regional (Grande-Terre) and farm (Gardel) scales, calculated on the union area of the cloud-free images.

### ***Planting mapping***

We do not try here to calculate step by step statistics of a dynamic process, but rather to have a assessment map of planted fields at the end of the planting season. We used the same procedure as for harvest monitoring, on a set of three images (from July to November, **Figure 3**).

The validation of the planting survey was performed against the AGRIGUA data base (1 100 ha planted in 2003 in Grande-Terre). The classification accuracy is given in **Figure 7** for the three methods.

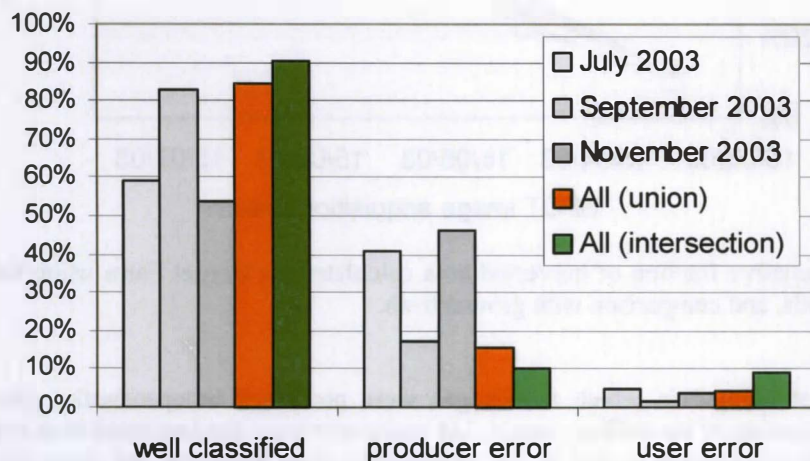


Figure 7 : Planted fields classification accuracy and errors in Grande-Terre (reference : AGRIGUA 2003) using different sets of SPOT images.

For the single date image processing, September image gives the best results in terms of planting classification accuracy (83% of well classified planted area), with 17% of lacking attribution (producer error) and 2% of excessive attribution (user error). As expected, July and November have a low classification accuracy ; in July, planting and so ploughing is not advanced enough to be identified by remote sensing, while in November the fields that were planted early in the season exhibit cane regrowth and are confounded with the ratoons regrowth.

On the cloud-free intersected area, the planting classification accuracy is very high (90%) with small producer (10%) and user (9%) errors. The user error can be explained by a fraction of classified ploughed field not devoted to cane growing.

## **6. An on-shelf GIS tool for management support**

To demonstrate how the results of this research could relate with the management processes of the sugar cane agricultural sector, we are developing a geographic information system (GIS) that integrates the analysis results presented above with a capacity to produce lightweight interactive maps to distribute the results to different kinds of final users at a low cost.

Our system is designed with three different kinds of users in mind :

- . Experts of remote sensing image analysis and spatial data analysis
- . GIS administrators
- . Final users who only need to browse interactive maps



The results of remote sensing image and spatial data analysis are provided by the experts who actually make the analysis work. The spatial data and attributes are imported into the database of our GIS, commonly in shapefile format.

The data model of that GIS is designed to represent data at different levels of spatial objects aggregation. At the lowest level is the field, with its geographical boundaries and a set of attributes. One level above we define groups of fields. Such group can represent a farm for example, or any other type of management unit. A set of attributes can be attached to those groups. Again one level above we can define groups of farms and associated attributes. And it is possible to define more aggregation levels as needed.

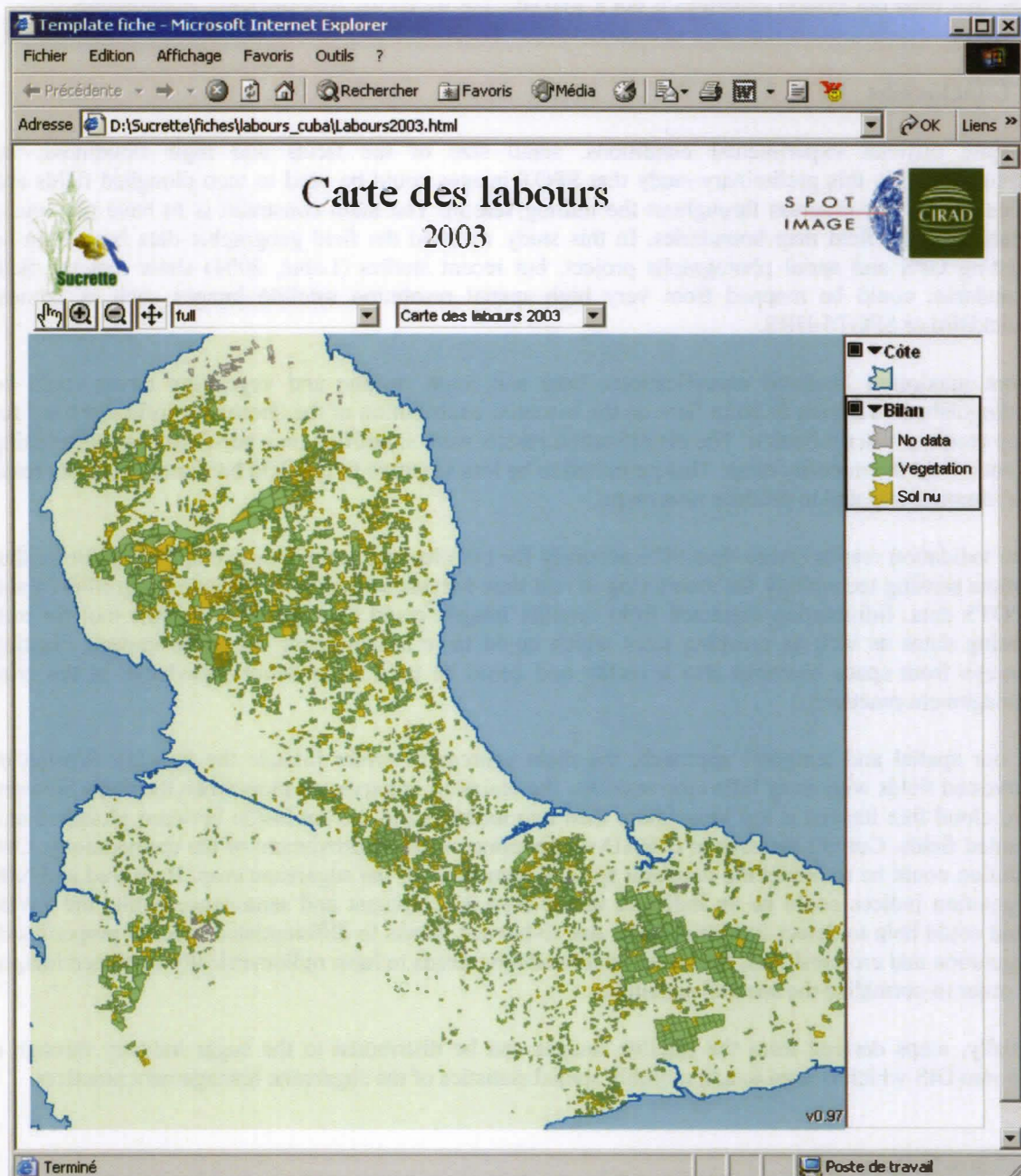


Figure 8 : Example of a screen of the sugarcane GIS tool.

The GIS is typically managed by a “GIS administrator” who has the capability to update the content of the database, view layers and perform complex requests as needed.

One original capability of that tool though is to generate lightweight interactive maps on demand. The GIS administrator selects a set of pre-defined forms to generate, like the “Sugar cane ploughing survey form” for example, and the software generates a directory with several data files and a HTML page (**Figure 8**). A light java mapping program is embedded in that HTML page, providing the possibility to distribute the interactive map to any final user without having to install a GIS software package on the final user’s computer system. A web browser is enough to browse the maps dynamically. Please note that what our system generates is not a web site, but we do use web mapping technologies.

## **7. Conclusions**

Despite difficult experimental conditions, small size of the fields and high cloudiness, we demonstrated in this preliminary study that SPOT images could be used to map ploughed fields and calculate harvest progress throughout the milling season. The main constraint is to have previously established the field map boundaries. In this study we used the field geographic data base from an existing GPS and aerial photographs project, but recent studies (Lainé, 2004) show that the field boundaries could be mapped from very high spatial resolution satellite images such as Ikonos, QuickBird or SPOT5-HRS.

From maximum likelihood classifications, bare soil, crop residue and vegetation cover could be distinguished. We want to point here on the essential contribution of the shortwave infra-red band for crop residues discrimination. The classification results were simplified on a per-field basis, attributing to each field the majority class. This permitted to be less sensitive to the field border effect, to increase the sampled area and to produce neat maps.

The validation results (more than 90% accuracy for both harvest and planting mapping) indicate that remote sensing technology for monitoring in real time harvest schedules is possible using SPOT4 and SPOT5 data. Information extracted from satellite images could be a decision support tool for mill closing dates as well as crushing rates which could have a significant economic impact. Planting surveys from space becomes also a reality and could be used for a better knowledge of the crop management practices.

In our spatial and temporal approach, the main sources of errors include the misclassification of harvested fields with no or little crop residues, the omission of harvested plots when the delay between two cloud-free images is too long (more than two months) and the confusion between ploughed and planted fields. Current research at CIRAD are focusing on the improvement of the methodology. One solution could be to model the temporal spectral signatures of the sugarcane crop. Both Red and NIR vegetation indices could be an indicator of the crop development and senescence, while the SWIR band could help to detect sudden changes due to harvest thanks to differentiated spectral properties of vegetation and crop residues. However, such modeling needs to have radiometrically corrected images in order to normalize the spectral signatures.

Finally, maps derived from the satellite images can be distributed to the sugar industry through a tailored GIS which is used to edit monthly spatial statistics of the sugarcane management practices.

## **Acknowledgements**

This research was funded by the French Research Ministry through the RTE Program (Réseau Terre & Espace). Especial thanks are due to Dominique Tressens, Crop Manager at the Gardel Farm, for providing agronomic data and useful expertise, and to Stéphanie Catsidonis, CIRAD Technical Volunteer, for her valuable field work.



## Bibliography

- Gers, C. and E. Schmidt (2001). Using SPOT4 satellite imagery to monitor area harvested by small scale sugarcane farmers at Umfolozi. 75<sup>th</sup> South African Sugar Technologists' Association (SASTA).
- Gers, C. J. (2003). Remotely sensed sugarcane phenological characteristics at Umfolozi South Africa. IGARSS'03, Toulouse (FR), IEEE.
- Hadsarang, W. and S. Sukmuang (2000). Utilization of landsat-5 (TM) imagery for sugarcane area Survey and mapping in Thailand. Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Taipei (Taiwan).
- Lainé, G. (2001). Cartographie et évaluation des surfaces cultivées en canne à sucre (1995 à 1999), CIRAD/DAF Guadeloupe/ FEOGA/FIDOM: 137p.
- Lainé G. (2004). "Appui technique au projet CIRAD-AGRIGUA". CIRAD, Montpellier, 59p.
- McDonald, L. and S. Routley (1999). Use of satellite imagery, remote sensing and spatial analysis to determine the area under cane prior to and during the harvest season, Herbert Cane Protection and Productivity Board: 28p.
- Narciso, G. and E. J. Schmidt (1999). Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing. 73<sup>rd</sup> South African Sugar Technologists' Association (SASTA).
- Noonan, M. (1999). Classification of fallow and yields using Landsat TM data in the sugarcane lands of the Herbert River catchment. Queensland, Herbert Resource Information Centre: 29p.
- Ribbes, F., A. Bégué, et al. (2002). Potentialités de la télédétection satellitaire pour la filière canne à sucre (Projet SUCRETTE). Perspectives de développement de la canne à sucre en milieu insulaire : approches technico-économiques, sociales et culturelles, St Leu, La Réunion (FR).
- Rudorff, B. F. T. and G. T. Batista (1990). "Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models." Remote Sensing of Environment 33: 183-192.
- Schmidt, E. J., G. Narciso, et al. (2000). Application of remote sensing technology in the South African sugar industry : Review of recent research findings. 74<sup>th</sup> South African Sugar Technologists' Association (SASTA).



## **REAL-TIME SUGARCANE HARVEST MONITORING USING SPOT 4&5 SATELLITE DATA**

By E. BAPPEL<sup>1</sup>, A. BÉGUÉ<sup>1</sup>, P. DEGENNE<sup>1</sup>, V. LEBOURGEOIS<sup>2</sup>, AND B. SIEGMUND<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5,  
France.

<sup>2</sup>CIRAD, Station de la Bretagne, BP20, 97408 Saint Denis Messagerie Cedex 9,  
Ile de La Réunion, France.  
bappel.teledetection@caramail.com

**KEYWORDS:** remote sensing, real-time, harvest monitoring, SPOT 4&5 satellites

### **Abstract**

In the context of the SUCRETTE project, (Système de sUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction) the Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) has set up a sugarcane harvest monitoring program using satellite data on Reunion Island. The methodology was based on the study of the time series SPOT 4&5 reflectance images during the 2003 harvest season from June to December. By analysing SPOT 4&5 satellites images, harvested fields and standing cane were easily identified. A multi spectral classification of the scene was used to produce a harvest map. It was possible to generate a sugarcane harvest map and statistics ten days after image acquisition. The methodology allowed for the determination of the harvest advance rate during the six months of the harvesting campaign. In the study this was obtained by producing sugarcane harvest maps at four times (03/07/21, 03/08/21, 03/10/14 and 03/11/20). The overall classification accuracy of the harvested fields reached 98.8% using 82 ground control fields. The harvest advance rate estimated by remote sensing was close to the mill observation, with a maximum error of 8%. Furthermore, the mill records and the harvested area can be used to estimate sugarcane yield. These results indicated that remote sensing technology could be adapted to monitor harvest schedules in real-time, using SPOT 4&5 data. Information extracted from satellite images could be a decision support tool for mill opening and closing dates as well as for crushing rates, which could have a significant economic impact.

### **Introduction**

The principal use of remote sensing for sugarcane monitoring is visual interpretation or image classification for sugarcane area mapping (McDonald and Routley, 1999; Narciso and Schmidt, 1999; Hadsarang and Sukmuang, 2000). The results are generally very acceptable

(accuracy of 90% or more) when high resolution satellite data (Landsat, SPOT) are acquired prior to the harvest season, when the crop canopy is fully developed. Literature references showed that remote sensing could be used to characterize sugarcane phenology, variety or water stress (Schmidt *et al.*, 2000; Gers, 2003).

In contrast, there are very few publications (Gers and Schmidt, 2001) on the use of remote sensing for cutting or planting surveys. This is because current satellite solutions are unable to provide the large number of image acquisitions during several consecutive months. In addition, due to cloudy tropical conditions, only satellites with a spatial resolution and programming capabilities adapted to the field-scale, like Spot satellites, offer an acquisition frequency high enough to monitor these dynamic processes.

On Reunion Island, two mills process the two millions tons of sugarcane produced annually. Each farmer has to harvest according to a quota of sugarcane per week. But sometimes, when rainy conditions are present farmers are not able to cut their weekly quotas. This is due to mechanization of the harvest process, and the soil compaction problems that could reduce future yields in the field.

Every year, some farmers are not able to harvest and deliver their whole quota due to the fixed mill opening and closing dates. In this context, CIRAD has conducted research to estimate the technical and economical feasibility of using remote sensing data for sugarcane harvest monitoring with SPOT 4&5 satellite data.

### **Methodology**

A methodology has been developed to estimate areas of harvested sugarcane, bare soil and standing cane from the Spot 4&5 satellites images (10 metres ground resolution) within sugarcane production areas. The goal is to provide, in quasi real-time, information on sugarcane harvest rate. This information must be available quickly after image acquisition to be useful as a decision support tool for harvest management and monitoring.

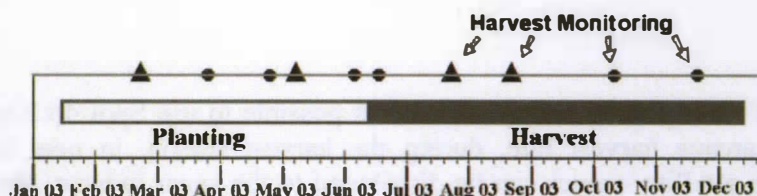
This methodology is based on the difference in spectral signatures between harvested sugarcane, bare soil and standing cane, allowing a maximum likelihood multi spectral classification. Prior classifications of bare soil were done to identify planted fields in 2003 before the beginning of the harvest season. These areas are not concerned by the next classification process. Training fields were selected by visual interpretation, and three classes were finally considered: bare soil, crop residues over bare soil and standing cane. The crop residues and bare soil classes were considered as harvested cane. The classified images and the vector layer of field boundaries are used to extract the percentage of harvested area for each geographical delivery unit.

The results are in statistical and cartographical form: harvest rate for each delivery centre and maps of harvested and standing cane on a field scale.

### **Results and validation**

In the 2003 harvest season, harvesting was monitored four times using Spot 4&5 images as described in Figure 1.





**Fig 1. – Date and type of Spot Images recorded over Reunion Island in 2003. Triangle symbols represent Spot 5 and circle symbols are for Spot 4 image acquisition.**

The trued harvest rate was calculated as the ratio of the tonnage accumulated on the date of interest to the final tonnage delivered at each delivery centre (data available from CTICS<sup>1</sup>). This value was compared to the harvest rate estimated by remote sensing.

**Table 1- Results of the harvest monitoring done for the 2003 Reunion Island milling season, ground data (CTICS), estimated by remote sensing and RMSE.**

Images acquisition	Monitored sugarcane area (ha)	Harvest rates Ground data (%)	Harvest rates Spot4&5 (%)	RMSE (%)
03/07/21	19591	8.9	10.9	2.8
03/08/21	11611	34.8	34.4	4.6
03/10/14	11449	62.3	63.9	6.1
03/11/20	7808	86.78	81.75	8.0

Validation of statistical and cartographical products by ground observations has been done on the four data sets. The results obtained for the harvest rate monitoring of the harvest season 2003 in Reunion Island and their comparisons with ground data are presented in Table 1. The Root Mean Square Error is expressed in harvest rate, i.e. for the 03/07/21, the harvest rate of each centre followed were estimated with an error more or less equal to 2.8%.

Validation of the harvest maps (Figure 2) is done with the Overall Accuracy Classification (the total precision of classification) which reaches 98.8%.



**Fig 2. – Post processed image of harvested field classification overlapping a Spot 5 image, 2.5 metre ground resolution, real colour composite.**

<sup>1</sup> CTICS: Centre Technique Interprofessionnelle de la Canne à Sucre, La Réunion.

## Conclusion

The validation of these results indicates that it is possible to use Spot 4&5 satellites data to estimate the sugarcane harvest rate, during the harvest season, in near real-time. Maps deduced from the satellite images can be distributed to the sugar industry through a tailored GIS which is used to edit monthly spatial statistics of the sugarcane management practices. A small java mapping program is embedded in a HTML page, providing the possibility to distribute the interactive map to any final user without having to install a GIS software package on the final user's computer system. A web browser is the only requirement to view the maps dynamically. Information extracted from satellite images could be used as a decision support tool for mill closing dates as well as crushing rates, which could have a significant economic impact.

## Acknowledgements

This research was supported by a "Région Réunion" Ph.D. Grant and was done in the context of the project ISLE\_Reunion © CNES : a remote sensing reference database developed by CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) for scientific and R&D studies, on "La Réunion" island. [http://medias.obs-mip.fr/isle\\_reunion/](http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/)

## References

- Gers, C. and Schmidt, E.** (2001). Using SPOT4 satellite imagery to monitor area harvested by small scale sugarcane farmers at Umfolozi. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 75: 28-33.
- Gers, C.J.** (2003). Remotely sensed sugarcane phenological characteristics at Umfolozi South Africa, Proceedings of the 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, July 2003, 3 pp [CD-ROM].
- Hadsarang, W. and Sukmuang, S.** (2000). Utilization of landsat-5 (TM) imagery for sugarcane area Survey and mapping in Thailand. Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Taipei (Taiwan).
- McDonald, L. and Routley, S.** (1999). Use of satellite imagery, remote sensing and spatial analysis to determine the area under cane prior to and during the harvest season. Cooperative Research Centre Report No. 03/99. Herbert Cane Protection and Productivity Board. 28 pp.
- Narciso, G. and Schmidt, E.** (1999). Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 73: 189-194.
- Schmidt, E.J., Narciso, G., Frost, P. and Gers, C.** (2000). Application of remote sensing technology in the South African sugar industry: Review of recent research findings. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 74: 192-200.

**ASSIMILATION OF A BIOPHYSICAL PARAMETER ESTIMATED BY REMOTE SENSING USING  
SPOT 4&5 DATA INTO A SUGARCANE YIELD FORECASTING MODEL**

BY

E. BAPPEL<sup>1</sup>, A. BÉGUÉ<sup>1</sup>, J.F. MARTINÉ<sup>2</sup>, A. PELLEGRINO<sup>1</sup>, B. SIEGMUND<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CIRAD, Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, France.

<sup>2</sup> CIRAD, Station de la Bretagne, BP20, 97408 Saint Denis Messagerie Cedex 9,  
Ile de La Réunion, France.

Email : bappel.teledetection@caramail.com

**KEYWORDS : SPOT satellite, NDVI, LAI, growth model**

**Abstract**

In the context of the SUCRETTE project, (*Système de sUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction*) CIRAD (*Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement*) has initiated a project to monitor growth of sugarcane in Reunion Island (55°60' E longitude, 20°90' S latitude). Ground measurements (Leaf Area Index) using a PCA Licor 2000 were taken from June 2002 to December 2002, coupled with SPOT 4&5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) images acquired during the same period. Yield estimates could be improved by combining remotely sensed data with growth models. The objective of this study was to determine a relationship between leaf area index (LAI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) generated from SPOT 4&5 images, and to establish whether there is a benefit in using remotely estimated LAI instead of simulated LAI to estimate yield. A strong relationship between LAI and NDVI was obtained using an exponential function ( $R^2=0.86$ ). A time series of 12 Spot images was used to produce NDVI profiles for each field. Gaps between dates were filled by fitting an empirical curve. LAI was estimated at a daily time step from the NDVI curve. The growth model Mosicas was forced using the estimated LAI. Actual yields were compared with yields simulated with and without LAI forcing. The coefficient of determination results indicate that  $R^2$  between observed and simulated yields is equal to 0.42 and 0.66 for simulation without forcing and for simulation with LAI forcing, respectively. The root mean square error of 19.3 t/ha without LAI forcing decreased to 12.8 t/ha using LAI forcing.

**Introduction**

Remote sensing tools can provide information about vegetation in various wavelengths: the solar spectrum (Guyot, 1996), the active and passive microwave (for example, for radar: Prévot *et al.*, 1993) and the thermal range (Moran *et al.*, 1994). It appears that remotely sensed measurements can be related to instantaneous values of various canopy variables.

Rudorff and Batista (1990) showed that yield estimations by Landsat MSS data (linear model with vegetation index) based only on one date or only on agro-meteorological data were less accurate than those based on the combined agro-meteorological-spectral model. The combined model consisted of a multiple linear regression integrating vegetation index and simulated yield, with a standard error ranging between 10 and 14 t/ha for a mean yield of 75 t/ha.

The objective of this study was (1) to establish the relationship between the LAI of sugarcane and its radiometric response formalized by the NDVI, and (2) to establish whether yield estimations from a growth model could be improved by using these data.



## Methodology

Several pre-processing steps were needed to use 12 Spot 4&5 multispectral images, ten metre resolution including: ortho-rectification, topographic normalization, numerical count to reflectance values, and finally, inter-calibration of the various sensors. This method involved establishing the relation between the LAI and corresponding NDVI values. NDVI values were calculated using the following equation according to Rouse *et al.* (1974):

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

where PIR and R are reflectance recorded by Spot 4&5 satellites in the near infra-red and red part of the solar spectrum, respectively. The relationship between LAI and NDVI was established by comparing 65 ground measurements of LAI with corresponding NDVI values. Each LAI observation was a field mean of three or four 20 m by 20 m sample areas within the field. Thirty LAI2000 measurements were taken on a diagonal line within each sample area.

A NDVI curve was fitted to 12 NDVI data points for each field by the square difference sum method with the R package used to fill gaps between dates. The resulting daily NDVI values were then used to estimate daily LAI values. These values were used as inputs for the Mosicas agro meteorological mechanistic growth model (Martiné, 2003).

Mosicas was used to simulate the final sugarcane yield obtained on 29 sugarcane fields, for both methods namely with and without LAI forcing (updating of LAI variable of the model derived from remote sensing). These fields were selected due to the availability of final NDVI and yield data and SPOT 4&5 images that were not restricted by cloud cover. The range of the field size is from 1.3 to 11 ha with a mean equal to 4.5 ha. The measured yields are from the mill records of sugarcane delivery for each field.

## Results

Figure 1 shows the relationship between the NDVI calculated from Spot 4&5 reflectance and ground measured LAI.

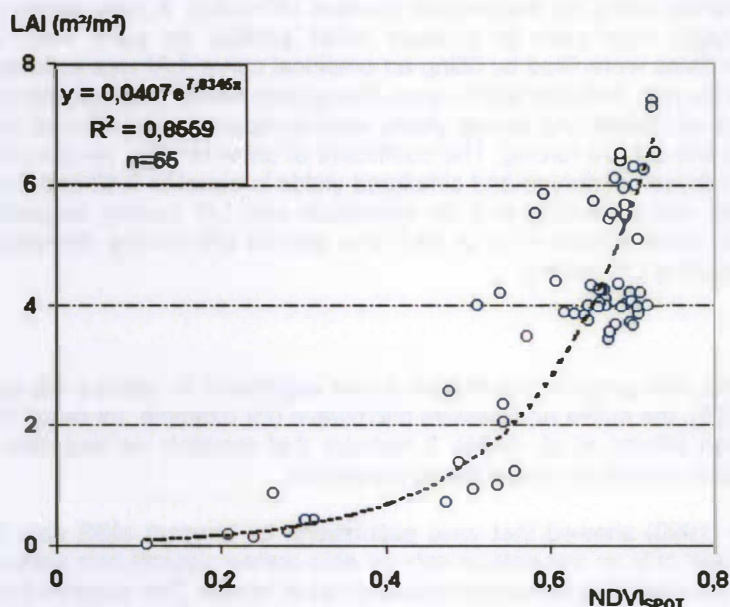


Fig. 1 – Relationship between sugarcane Leaf Area Index (LAI) and SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

The coefficient of determination was equal to 0.86 and was significant at  $P < 0.001$  ( $n=65$ ). The relationship is described by an exponential function with the following formula:



$$\text{LAI} = 0.0407 \times \text{EXP}(7.0345 \times \text{NDVI}_{\text{SPOT}})$$

Figure 2 shows an example of the fitted NDVI curve obtained for a field. A logistic equation gave the best fit.

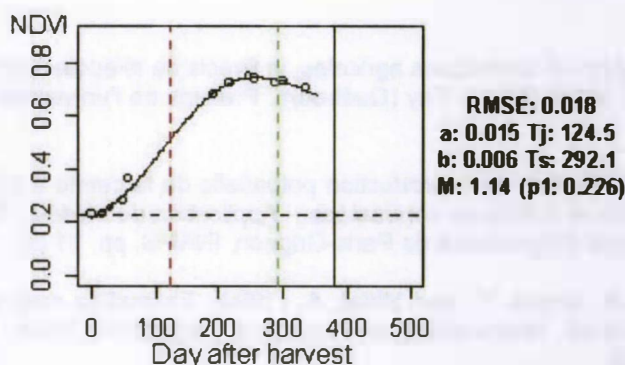


Fig. 2 – Empirically fitted Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) curve and NDVI data points for a field grown in the 2002-2003 season.

Yields estimated with and without the LAI forcing strategy are compared with measured yields. Results are presented in Figure 3.

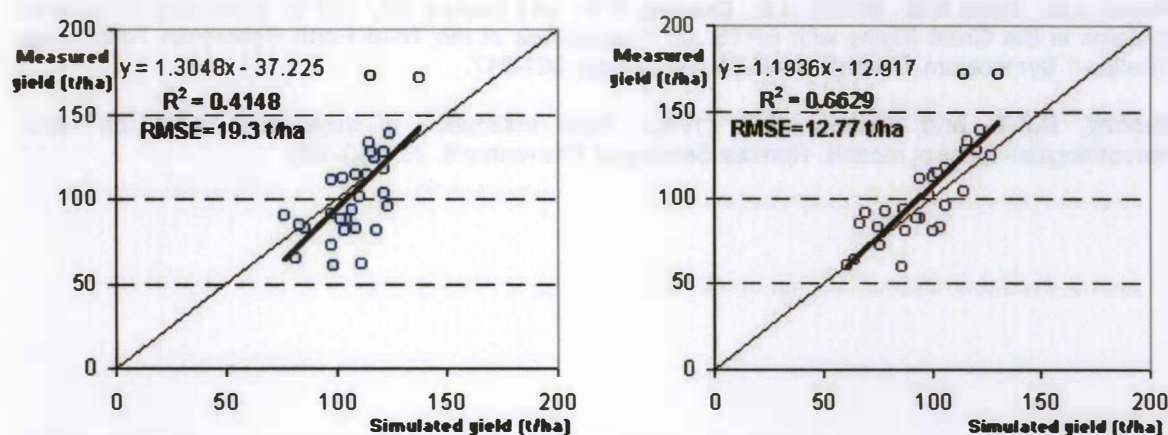


Fig. 3 – Comparison of Mosicas (agro meteorological mechanistic growth model) simulated to observed sugarcane yield with and without leaf area index (LAI) forcing.

The root mean square error of 19.3 t/ha for simulations without forcing decreased to 12.8 t/ha for simulations with LAI forcing (Figure 3). Moreover, the coefficient of determination increased considerably to reach the value of 0.67 with LAI forcing compared to 0.42 without LAI forcing.

## Conclusion

A strong relationship was established between sugarcane LAI and the NDVI generated from SPOT 4&5 data. In addition, we could calculate the adjusted NDVI for each field, necessary for obtaining the NDVI values at a daily time step. The root mean square error obtained between the observed NDVI and the NDVI logistic functions was at maximum equal to 0.03 for a mean NDVI of 0.45. Finally, sugarcane yield estimated using growth models like Mosicas could be improved significantly by forcing the model with LAI values estimated from NDVI data from SPOT data. Our research turns to the study of the relationship which can exist between the maximum of NDVI and the final yields of sugarcane. If the relationship between the maximum of NDVI and the final yields is significant, it will be possible to estimate final yields only from the radiometric SPOT data, using fewer images.

## Acknowledgements

This research was supported by a "Région Réunion" Phd Grant and was done in the context of the project ISLE\_Reunion © CNES : a remote sensing reference database developed by CNES (Centre

National d'Etudes Spatiales) for scientific and R&D studies, on "La Réunion" island. [http://medias.obs-mip.fr/isle\\_reunion/](http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/)

## References

**Guyot, G.** (1996). Agriculture et statistiques agricoles, in *Précis de télédétection: Tome 2, Applications thématiques*, edited by F. Bonn (Sainte Foy (Québec)) : Presses de l'université de Québec, pp. 269-316.

**Martiné J.F.** (2003). Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées – Application du modèle. Thèse pour le grade de Docteur de l'Institut National d'Agronomie de Paris-Grignon, INAPG, pp. 11-38.

**Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. and Vidal, A.** (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49: 246-263.

**Prévoit, L., Dechambre, M., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., Normand, M., and Galle, S.** (1993). Estimating the characteristics of vegetation canopies with airborne radar measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2803-2818.

**Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. and Harlan J.C.** (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351*, pp. 301-317.

**Rudorff, B.F.T. and Batista, G.T.** (1990). Yield estimation of sugarcane based on agro-meteorological-spectral models. *Remote Sensing of Environment*, 33: 183-192.

## **Remerciements**

*Je remercie Agnès Bégué de m'avoir accueillie au sein de l'équipe GEOTROP et de m'avoir parfaitement guidée dans ce projet. Je la remercie pour cette année passée, autant enrichissante qu'agréable. Un grand merci également à Laurent Prévot d'avoir donné de son temps pour cette étude et de m'avoir initiée au logiciel R que je n'ai plus lâché depuis ! Merci à Pascal Degenne, Alain Clopes et Gérard Desprès pour les aides multiples d'informatique entre autres, et pour leur sympathie. Je remercie Marie Guitton et Stéphanie Catsidonis pour leur apport essentiel à cette étude tant pour la récolte de données que pour l'aide à la réflexion. Je les remercie pour leur agréable compagnie. Merci à Eric Bappel de m'avoir généreusement guidée dans la compréhension de MapInfo, d'Erdas et de la canne. Merci enfin à tous les autres membres de l'équipe pour leur gentillesse et pour leur aide pour certains d'entre eux. Merci notamment à Sylvie Blin, Guilhem Grellet, Nicole Itis, Gérard Laine, Camille Lelong, Pierre Jean L'Hôte, Valerie Soti et Nicolas Vila Je n'oublie pas dans mes remerciements l'équipe Canne qui a aussi largement contribué à la réflexion et à la mise en place des expérimentations. Merci à Pierre Todoroff pour ses aides multiples et pour ses qualités humaines. Merci également à Robert Domaingue, Jean-François Martiné et Roland Pirot.*